

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERIA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERA  
AMBIENTAL**

**TEMA:  
IMPLEMENTACION Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR SOLAR  
RECICLANDO EL JUEGO ÓPTICO DE UN PROYECTOR DE SLIDES  
PARA INVESTIGAR EL COMPORTAMIENTO DE CELDAS  
FOTOVOLTAICAS TIPO PELICULA FINA.**

**AUTORA:  
FERNANDA SOLEDAD TAMAYO CUEVA**

**DIRECTORA:  
MARÍA CRISTINA CALERO ARMAS**

**Quito, mayo de 2015**

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaro que los conceptos, los análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de la autora.

Quito, mayo de 2015

---

Fernanda Soledad Tamayo Cueva  
C.I. 1719102996

## **DEDICATORIA**

A Dios quien guía mis pasos, a mi amado esposo por su infinito amor y apoyo, a mi madre, a mi abuela, a mis hermanas y a un gran amigo casi hermano.

Fernanda Soledad Tamayo Cueva

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Politécnica Salesiana por los conocimientos impartidos a lo largo de mi formación académica y espiritual.

A la Escuela Politécnica Nacional y al Director del Laboratorio de Películas Delgadas por permitirme usar sus instalaciones y equipos para el desarrollo de la presente tesis.

A aquellos profesores que aportaron a mi crecimiento académico, en especial, a mi tutora de tesis, por su colaboración y su gran vocación como docente e investigadora.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>2</b>
<b>BASES TEÓRICAS .....</b>	<b>2</b>
1.1. Energía renovable.....	2
1.1.1. Energía hidroeléctrica .....	2
1.1.2. Energía eólica.....	3
1.1.3. Energía geotérmica.....	6
1.1.4. Energía proveniente de biomasa .....	8
1.1.5. Energía solar fotovoltaica .....	9
1.2. El Sol.....	11
1.3. La atmósfera terrestre.....	12
1.3.2. Estratósfera.....	13
1.3.3. Mesósfera .....	13
1.3.4. Termósfera .....	13
1.3.5. Exosfera.....	13
1.4. Radiación solar.....	14
1.4.1. Espectro electromagnético solar. ....	15
1.5. Efecto fotoeléctrico .....	17
1.6. Lentes .....	17
1.6.1. Lentes convergentes.....	18
1.6.2. Lentes divergentes.....	19
1.7. Funcionamiento de proyectores de slides y retroproyectores .....	19
1.7.1. Proyector de slides. ....	19
1.7.2. Retroproyector.....	20
1.8. Celdas fotovoltaicas .....	20
1.8.1. Semiconductor.....	20
1.8.2. Funcionamiento celda fotovoltaica. ....	21
1.8.3. Tipos de celdas fotovoltaicas .....	21
1.9. Curvas corriente – voltaje .....	22
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>25</b>
<b>GESTIÓN Y ANÁLISIS AMBIENTAL DEL RECICLAJE DE MATERIALES</b> <b>.....</b>	<b>25</b>

2.1. Descripción de recursos .....	25
2.1.1. Recurso material.....	25
2.1.2. Recurso humano.....	26
2.1.3. Ambiente de trabajo .....	26
2.2. Gestión para la obtención de los materiales del simulador solar .....	27
2.3. Materiales para la construcción del simulador solar .....	29
2.3.1. Lentes .....	30
2.3.2. Lámparas .....	32
2.3.3. Columna de agua.....	35
2.3.4. Filtro.....	36
2.3.5. Fuente de alimentación .....	36
2.3.6. Soportes y rieles .....	38
2.4. Posibles aplicaciones ambientales del simulador solar .....	39
2.4.1. Aplicación del simulador solar para el crecimiento de plantas.....	40
2.4.2. Aplicación del simulador solar para estudios de efectos de radiación solar en la salud. ....	41
2.4.3. Aplicaciones del simulador solar en al ámbito industrial .....	42
2.5. Análisis ambiental del reciclaje de materiales para construir el simulador solar ...	42
2.6. Análisis financiero .....	44
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>46</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SIMULADOR SOLAR.....</b>	<b>46</b>
3.1. Diseño del simulador solar.....	46
3.1.1. Teoría del diseño del simulador solar .....	46
3.1.2. Características de los componentes del simulador solar:.....	46
3.1.3. Pruebas preliminares para determinación del diseño .....	49
3.1.4. Disposición final de los componentes en el simulador solar .....	56
3.2. Caracterización de los lentes:.....	57
3.3. Procedimiento de construcción del simulador solar.....	60
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>63</b>
<b>CALIBRACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SIMULADOR SOLAR.....</b>	<b>63</b>
4.1. Funcionamiento del espectrómetro .....	63
4.2. Calibración del simulador solar .....	64
4.2.1. Metodología de la calibración del simulador solar .....	64

4.2.2. Temporalidad del simulador solar.....	70
4.2.3. Espacialidad del simulador solar.....	71
4.2.4. Implementación del simulador solar .....	72
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>LISTA DE REFERENCIAS .....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>799</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Generación eléctrica en Ecuador.....	3
<i>Figura 2.</i> Potencial eólico de Ecuador .....	5
<i>Figura 3.</i> Potencial eólico en Megavatios.....	6
<i>Figura 4.</i> Potencial eólico en GWh/año.....	6
<i>Figura 5.</i> Mapa de proyectos geotérmicos potenciales en el Ecuador.....	8
<i>Figura 6.</i> Sistema fotovoltaico.....	11
<i>Figura 7.</i> Capas de la atmosfera y su temperatura.....	14
<i>Figura 8.</i> Espectro electromagnético solar .....	15
<i>Figura 9.</i> Tipos de radiación solar .....	16
<i>Figura 10.</i> Efecto fotoeléctrico .....	17
<i>Figura 11.</i> Elementos de un lente .....	18
<i>Figura 12.</i> Lentes convergentes.....	19
<i>Figura 13.</i> Lentes divergentes.....	19
<i>Figura 14.</i> Estructura tetraédrica del silicio.....	21
<i>Figura 15.</i> Átomos de silicio ordenados en forma de red.....	21
<i>Figura 16.</i> Curva I-V celda fotovoltaica a temperatura constante.....	23
<i>Figura 17.</i> Curva I-V celda fotovoltaica con irradiancia constante.....	23
<i>Figura 18.</i> Laboratorio de Películas Delgadas.....	27
<i>Figura 19.</i> Lente de cámara fotográfica.....	31
<i>Figura 20.</i> Lentes de proyectores.....	32
<i>Figura 21.</i> Lentes de proyector de slides .....	32
<i>Figura 22.</i> Lente de cámara de fotos .....	32
<i>Figura 23.</i> Lente varios.....	32
<i>Figura 24.</i> Lámpara halógenas y de xenón.....	33
<i>Figura 25.</i> Columna de agua.....	36
<i>Figura 26.</i> Filtro azul UV .....	36
<i>Figura 27.</i> Batería de automóvil .....	37
<i>Figura 28.</i> Fuente de poder DC con regulación.....	37
<i>Figura 29.</i> Fuente de poder sin regulación .....	38
<i>Figura 30.</i> Rieles metálicos del laboratorio.....	38
<i>Figura 31.</i> Rieles recicladas.....	38
<i>Figura 32.</i> Riel y nueces en el simulador definitivo.....	39



<i>Figura 33.</i> Agujero en la capa de ozono .....	40
<i>Figura 34.</i> Lentes en soportes metálicos. ....	47
<i>Figura 35.</i> Lentes en soportes madera. ....	47
<i>Figura 36.</i> Determinación práctica de distancias focales. ....	47
<i>Figura 37.</i> Columnas de agua usadas en las pruebas.....	48
<i>Figura 38.</i> Cono de papel blanco.....	50
<i>Figura 39.</i> Cono de papel en soporte a la altura .....	50
<i>Figura 40.</i> Papel aluminio para cubrir el cono. ....	51
<i>Figura 41.</i> Cono con papel aluminio encendido.....	51
<i>Figura 42.</i> Cono de color negro.....	52
<i>Figura 43.</i> Lámpara en lata de bebida .....	52
<i>Figura 44.</i> Lámpara en lata pintada .....	53
<i>Figura 45.</i> Carcasa reciclada de lámpara de patio .....	53
<i>Figura 46.</i> Estructura cerrada vista frontal .....	54
<i>Figura 47.</i> Estructura cerrada vista lateral.....	54
<i>Figura 48.</i> Estructura cerrada con lentes grandes y pequeños.....	55
<i>Figura 49.</i> Estructura con lentes grandes.....	56
<i>Figura 50.</i> Estructura con lentes grandes.....	56
<i>Figura 51.</i> Representación experimento para determinar distancias focales.....	58
<i>Figura 52.</i> Retroproyector reciclado.....	60
<i>Figura 53.</i> Proyector de slides reciclado.....	61
<i>Figura 54.</i> Lentes pequeños del proyector de slides.....	61
<i>Figura 55.</i> Representación radio de curvatura.....	62
<i>Figura 56.</i> Esquema básico espectrómetro óptico .....	63
<i>Figura 57.</i> Espectrómetro Ocean Optics USB 4000.....	64
<i>Figura 58.</i> Espectro solar natural de Quito.....	65
<i>Figura 59.</i> Espectro de referencia ASTM.....	65
<i>Figura 60.</i> Espectros solares en Quito y de referencia .....	66
<i>Figura 61.</i> Espectro de lámpara halógena.....	66
<i>Figura 62.</i> Espectro de lámpara de xenón .....	67
<i>Figura 63.</i> Espectros de Quito, lámpara halógena y de xenón. ....	67
<i>Figura 64.</i> Espectros de la lámpara halógena con y sin columna de agua.....	68
<i>Figura 65.</i> Espectros de Quito, lámpara halógena con y sin columna de agua .....	68
<i>Figura 66.</i> Espectros de Quito y lámpara halógena con columna de agua. ....	69

<i>Figura 67.</i> Espectro simulado con el arreglo de luces led .....	69
<i>Figura 68.</i> Espectros de Quito y del simulador solar .....	70
<i>Figura 69.</i> Espectro medidos cada 10 minutos.....	70
<i>Figura 70.</i> Área de incidencia y puntos de toma de medidas .....	71
<i>Figura 71.</i> Espectros en 4 puntos del área de incidencia.....	71
<i>Figura 72.</i> Curvas I-V de celda solar fotovoltaica.....	72
<i>Figura 73.</i> Gráfico Curva I-V de celda Fotovoltaica.....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Áreas de prioridad para la generación geotérmica</i> .....	7
Tabla 2. <i>Composición del biogás</i> .....	9
Tabla 3. <i>Resumen recurso material herramientas / equipos</i> .....	26
Tabla 4. <i>Gestión de materiales</i> .....	28
Tabla 5. <i>Materiales del simulador solar</i> .....	29
Tabla 6. <i>Combinaciones de elementos químicos de un led</i> .....	34
Tabla 7. <i>Tiempo de degradación de materiales reciclados</i> .....	44
Tabla 8. <i>Costo de materiales</i> .....	45
Tabla 9. <i>Características de lentes</i> .....	57
Tabla 10. <i>Determinación de las distancias focales de los lentes</i> .....	59

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Inventario de materiales y herramientas del laboratorio de películas delgadas.....	79
---	----

## **RESUMEN**

El presente proyecto detalla la implementación y calibración de un simulador solar empleando para tal efecto el juego óptico de un proyector de slides reciclado y otros materiales reutilizados y de fácil acceso.

Los estudios realizados previo y durante la construcción del simulador, así como la naturaleza reciclada de los materiales empleados, llevaron a un continuo esfuerzo en la etapa de pruebas y calibración hasta concluir un simulador definitivo, a más de la reingeniería continua a los diseños originales resultantes del estudio teórico.

Partiendo de las nuevas consideraciones de carácter constructivo, se realizó el rediseño del modelo óptico instalado, con el objetivo de cumplir con los límites establecidos para alcanzar rangos aceptables de similitud entre los espectros solares simulados versus los espectros reales tomados en la ciudad de Quito-Ecuador , a más de lo establecido en normas ASTM internacionales para determinar el rendimiento fotovoltaico.

Con la implementación y calibración del simulador solar, se realizaron pruebas esenciales para verificar su comportamiento frente a la incidencia en celdas fotovoltaicas, logrando de esta manera expresar el rendimiento de estas últimas en términos de corriente – voltaje con un espectro solar completamente simulado.

Con esto, la calidad del espectro simulado y su aplicación en celdas fotovoltaicas se encuentran garantizadas, brindando la posibilidad de ejecutar pruebas continuas aplicadas a proyectos de desarrollo en el estudio de fotoceldas, promoviendo a su vez la reutilización de material descartado en fines prácticos y de gran impacto en el desarrollo de nuevas e innovadoras iniciativas para nuestra sociedad.

## **ABSTRACT**

This project details the implementation and calibration of a solar simulator using for this purpose the optical illusion of a projector slides and other recycled and reused materials easily accessible.

Studies conducted before and during the construction of the simulator and recycled nature of the materials used, led to a comprehensive and sustained effort at the stage of testing and calibration to conclude a definitive simulator, to more than one continuous reengineering designs Original resulting from theoretical study.

Based on the new constructive considerations, the redesign of installed optical model was performed in order to comply with the limits for achieving acceptable ranges of similarity between simulated solar spectra versus the actual spectra taken in the city of Quito-Ecuador, over the provisions of ASTM International standards to determine the PV performance.

With the implementation and calibration of solar simulator, essential tests were performed to verify its performance against the impact on photovoltaic cells, thus achieving express the performance of the latter in terms of current - voltage with a fully simulated solar spectrum.

With this, the quality of the simulated spectrum and its application in photovoltaic cells are secured, providing the ability to run continuous tests applied to development projects in the study of photocells, turn promoting the reuse of discarded material in convenience and in major impact on the development of new and innovative initiatives for our society.

## INTRODUCCIÓN

La demanda por servicios con altos niveles de calidad y eficiencia, a más del cada vez más importante carácter renovable con el que debe contar la fuente primaria de energía de dichos servicios, ha provocado el emprendimiento de nuevas iniciativas para el desarrollo del campo de la energía renovable y las celdas fotovoltaicas.

Para cumplir con los parámetros que la demanda plantea, es necesario buscar alternativas viables y amigables con el medio ambiente, implementando herramientas para que los sistemas resultantes sean sostenibles, eficientes y confiables durante un tiempo determinado.

Buscando el cumplimiento a lo expuesto anteriormente, se plantea el reutilizar material en desuso o dañado acompañado de una fuerte base teórica para emprender la construcción de un simulador solar que contribuya la investigación en los campos mencionados.

La construcción de un simulador solar empleando material reciclado de equipos en desuso o dañados, representa un reto con altos niveles de exigencia de carácter tanto teórico como práctico, sin perder de vista el impacto ambiental, económico y científico de un proyecto de estas características.

Los riesgos inherentes al reciclaje de material expuestos en la construcción de una herramienta tecnológica, permiten demostrar que el uso eficiente de los recursos requiere no solo de la buena voluntad de quienes lo impulsan, sino también de medidas de control de calidad de mayor efectividad orientadas a garantizar que los productos resultantes sean confiables y óptimos para su aplicación en el campo requerido.

Con esto, el presente trabajo pretende dar un ejemplo de una iniciativa que ayudará en el desarrollo de una necesidad imperante, con la idea firme de que los esfuerzos conjuntos de todos quienes vivimos en este, nuestro planeta, podemos siempre generar un buen cambio positivo.

## **CAPÍTULO 1**

### **BASES TEÓRICAS**

#### **1.1. Energía renovable**

La búsqueda de nuevas formas de generación de energía en Ecuador se ha intensificado en las últimas décadas ya que las cantidades finitas de combustibles fósiles (la principal fuente de energía usada en todo el mundo) empiezan a decrecer y en los próximos años será necesario tener otras alternativas que además de ser amigables con el ambiente sean baratas y permanentes.

El impacto ambiental causado por el uso de combustibles fósiles produce gases peligrosos para el ambiente y para la salud. De estos, el CO<sub>2</sub> es uno de los principales gases que contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global. Otro problema relevante es la producción de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, que ascienden a la atmosfera y producen lluvia ácida que al precipitarse contamina suelo y agua repercutiendo negativamente en la flora y fauna. La lluvia ácida por su característica corrosiva constituye también un problema para las infraestructuras y edificaciones (Castells & Bordas, 2012, págs. 101-103).

Para entender de mejor manera sobre energía renovable, es necesario introducir el término “sostenibilidad” la cual se entiende como el uso de recursos naturales para satisfacer las necesidades de generaciones presentes sin vulnerar las necesidades de generaciones futuras (Moller, 2006, pág. 23), de esta manera podemos entender que la energía renovable usa recursos naturales que se deben renovar a una tasa mayor de lo que se utilizan, y así garantizar que los recursos que hoy producen energía útil, perduren y produzcan energía útil en el futuro.

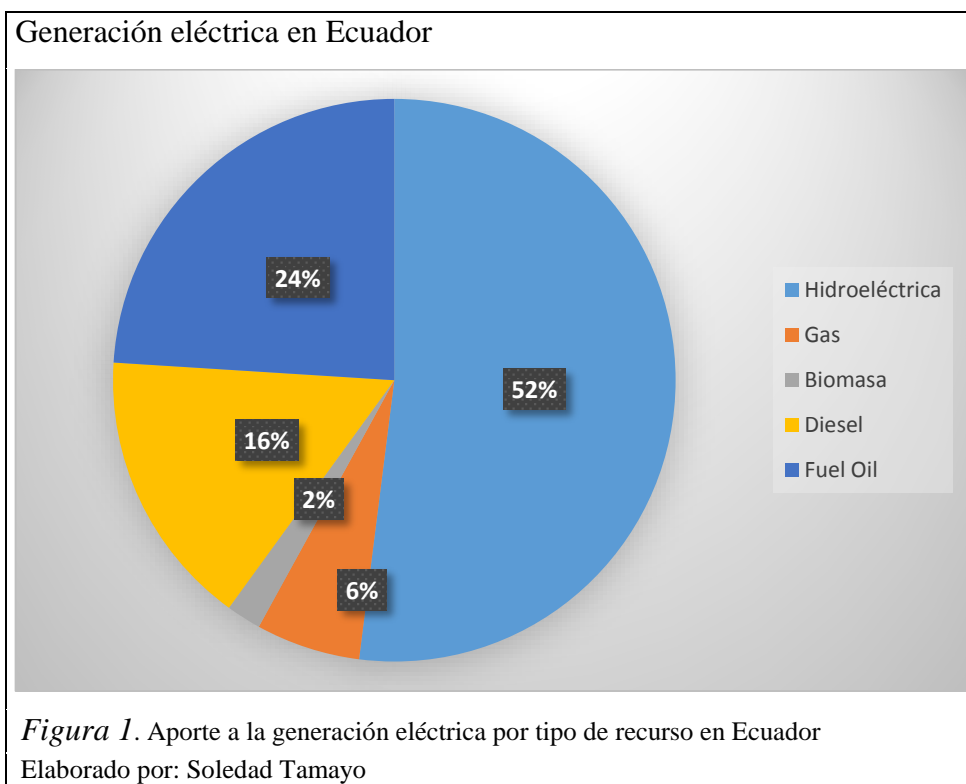
A continuación se mencionan los principales tipos de fuentes de energía renovable en el país:

##### **1.1.1. Energía hidroeléctrica**

Es la más usada y desarrollada en Ecuador. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial del agua represada en un embalse que se encuentra un nivel más alto de la casa de máquinas donde se hallan las turbinas. El agua se conduce desde el embalse por medio de la tubería de presión hacia la turbina que gira y transmite la



rotación desde el generador unido al eje de la turbina hacia el rotor constituido por hilos de cobre. En la Figura 1 se puede observar que la energía hidroeléctrica representa un 52% de la energía producida en el Ecuador.



Actualmente en el Ecuador la capacidad de generación hidroeléctrica instalada, es de “4 501 MW” (El Comercio, 2014, pág. 28), se prevé que Coca – Codo Sinclair “genere 1 500 MW de energía eléctrica ecológicamente limpia” (El Comercio, 2014, pág. 28).

Entre las prioridades que se han establecido en el actual régimen político, el cambio de la matriz energética es una de ellas, es así que durante los últimos años se ha invertido en generación de energía hidroeléctrica y a partir del 2016 y en adelante se pondrá en funcionamiento 8 centrales hidroeléctricas que abastecerán de energía al país (Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Sudamérica Andes, 2012, pág. 1).

#### 1.1.2. Energía eólica

Es aquella energía proveniente del uso de masas de aire (viento) para mover las palas del rotor de aerogeneradores que producen energía eléctrica. El uso de la energía que produce la fuerza del movimiento del viento ha sido usado por la humanidad desde tiempos remotos para mover navíos o para moler cereales, sin embargo es ahora que este tipo de recurso se desarrolla a grandes pasos y se constituye una alternativa viable

para proveer de energía útil y amigable con el ambiente.

Los parques eólicos de la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos con una capacidad de “2,4 [MW]” (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013, pág. 1), y el parque eólico Villonaco en Loja con “16,5 [MW]” (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013, pág. 1) son la evidencia del desarrollo de energía eólica en Ecuador. Es así que el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables presentó en marzo del 2013 el primer atlas eólico del Ecuador el cual contiene entre otras cosas, datos de las ciudades más aptas para la instalación de parques eólicos y estudios formales del potencial eólico señalados en la Figura 2, que podrían ser aprovechados en un futuro para generar y diversificar las fuentes de obtención de energía eléctrica.

En la Figura 3 podemos observar la cantidad de potencia en Megavatios que podría ser generada a partir de un potencial eólico, así como en la Figura 4 la cantidad de potencia que podría ser consumida en el periodo de un año por las provincias determinadas como potenciales para la generación de energía eólica.

## Potencial eólico del Ecuador

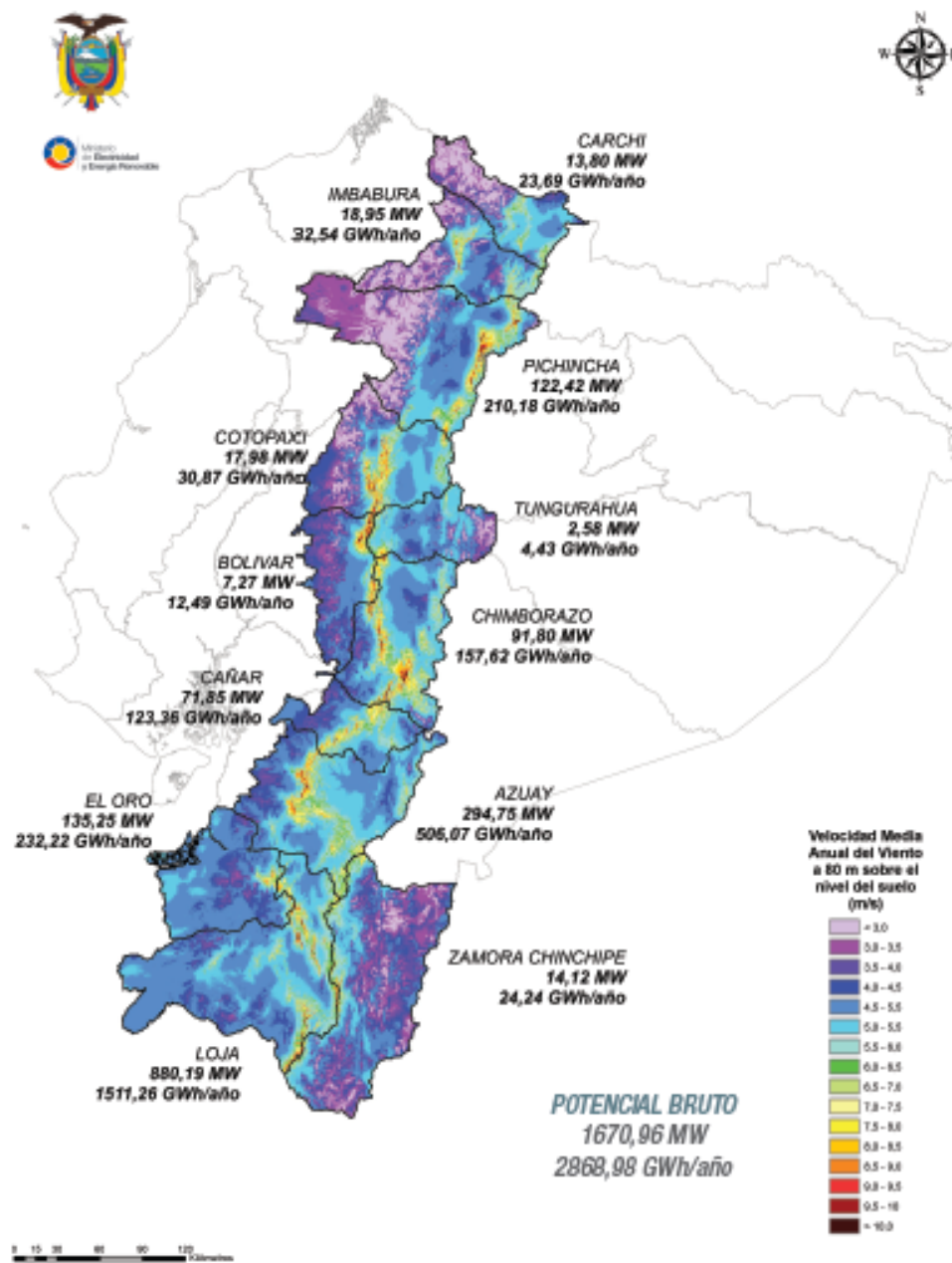
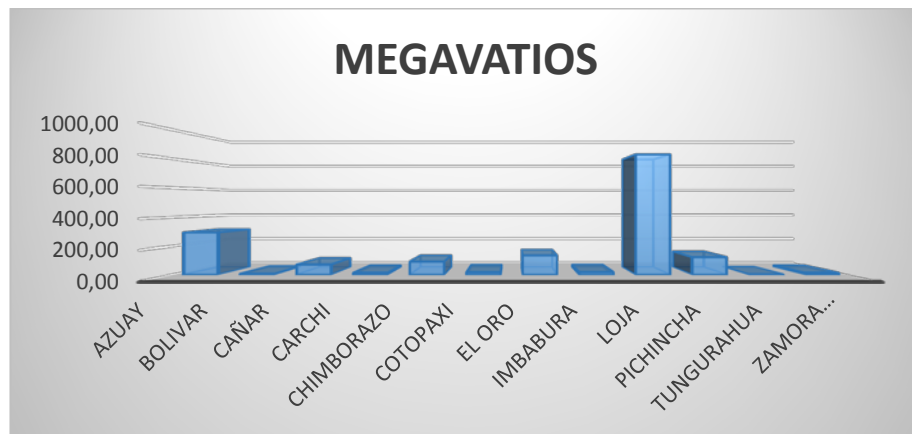


Figura 2. Potencial bruto eólico de Ecuador

Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013)

### Potencial eólico MW

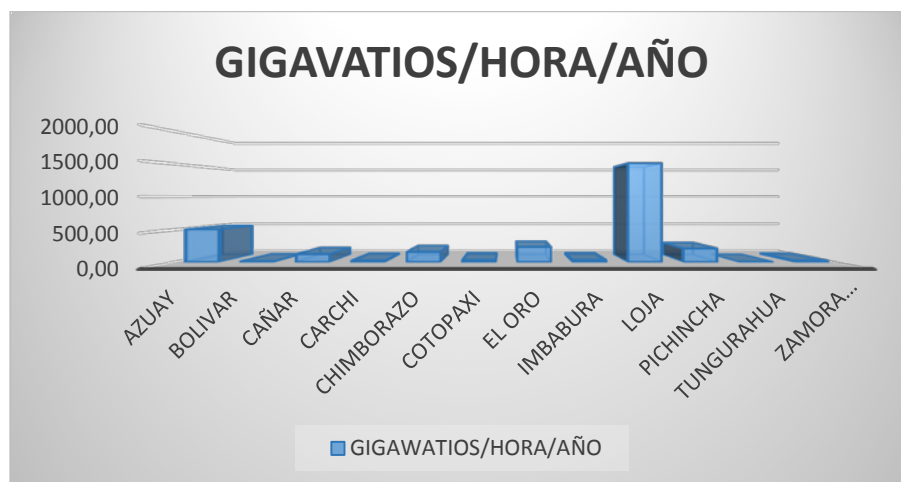


**Figura 3.** Cantidad de potencia activa en Megavatios que podría ser generada a partir de un potencial eólico.

Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013)

Elaborado por: Soledad Tamayo

### Potencial eólico GWh/año



**Figura 4.** Cantidad de potencia activa que podría ser consumida en el periodo de un año con una media de uso de 5 horas al día.

Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013)

Elaborado por: Soledad Tamayo

### 1.1.3. Energía geotérmica

Este tipo de energía proviene del interior de la Tierra, puntos donde el calor se concentra y calienta acuíferos hasta producir vapor de agua que asciende por un pozo perforado artificialmente al llegar a la superficie mueve una turbina la cual genera electricidad. Esta se considera como energía renovable ya que el fluido geotérmico usado para generar energía eléctrica es enfriado y puede ser reinyectado al reservorio

geotérmico.

En Ecuador se han estudiado varios sitios prioritarios para la generación de energía geotérmica. En la Tabla 1 se observa dichos sitios.

Tabla 1.  
*Áreas de prioridad para la generación geotérmica.*

Área de interés	Generación esperada
Chachimbiro	113 [MW]
Tufiño	138 [MW]
Chalupas	283 [MW]

Nota. (CONELEC, 2008, pág. 214)

Elaborado por: Soledad Tamayo.

En el 2008 el Consejo Nacional de Electricidad realizó nuevos estudios geotérmicos en el país y publicó una lista de 22 áreas de interés geotérmico en el Ecuador. A pesar de conocerse este potencial, los altos costos para el financiamiento de la tecnología y capacitación del recurso humano necesario para su explotación han limitado el aprovechamiento de este recurso.

En la Figura 5 se observa el mapa geotérmico del Ecuador con los lugares que presentan potenciales sitios de generación de energía, sin embargo estos aún no están en marcha.

Mapa de proyectos geotérmicos en el Ecuador.

*Figura 5.* Mapa de proyectos geotérmicos potenciales en el Ecuador  
Fuente: (Explored, 2010, pág. 1)

#### 1.1.4. Energía proveniente de biomasa

Todo residuo orgánico doméstico, agrícola, ganadero o forestal es biomasa y puede ser usado para generar energía, la vía más usada es por medio de la digestión anaerobia, que consiste en confinar la biomasa en un digestor donde las bacterias anaerobias, que actúan en ausencia de oxígeno descomponen la materia orgánica produciendo biogás que en su mayoría está constituido por metano, el cual es conducido fuera del digestor y combustionado para producir energía eléctrica.

La Tabla 2 resume la composición del biogás producido en un biodigestor y sus respectivos porcentajes.

Tabla 2.  
*Composición del biogás*

Elemento constituyente	Porcentaje
Metano (CH <sub>4</sub> )	55 a 75%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30 a 45%
Sulfuro de Hidrogeno (H <sub>2</sub> S)	1 a 45%
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0 a 1%
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0 a 1%
Monóxido de Carbono (CO)	Trazas
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	Trazas

Nota. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014).

Elaborado por: Soledad Tamayo.

Además del biogás que se usa para generar electricidad se obtiene un subproducto de este proceso (lodos orgánicos) que se producen como residuos y precipitan en el digestor, los lodos orgánicos pueden ser usados como abono para tierra de cultivo.

Entre el 2011 y el 2013 en el Jardín Botánico de Quito se albergó un biodigestor demostrativo que actualmente se encuentra en la estación del INIAP Santa Catalina en Quito (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014, pág. 1).

Actualmente el camal metropolitano de Quito construyó un biodigestor piloto que sirve para hacer pruebas con el fin de implementar un biodigestor definitivo (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014, pág. 1).

#### 1.1.5. Energía solar fotovoltaica

La energía que se obtiene del sol es inagotable, limpia y suficiente para satisfacer las necesidades de la humanidad, sin embargo esta forma de obtención de energía eléctrica no ha sido desarrollada lo suficiente, como para dejar de depender de las fuentes convencionales, que en su mayoría son no renovables y muy contaminantes (petróleo, carbón y gas natural).

“Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en utilizable como energía eléctrica.” (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2007, pág. 37)

Para la generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos es necesario:

- Subsistema de captación (panel fotovoltaico): es el encargado de generar electricidad a partir de la radiación solar que incide sobre él, el principio fundamental de su funcionamiento es el efecto fotoeléctrico. Un panel solar está elaborado de un material semiconductor el cual tiene la propiedad de mediante un estímulo externo liberar electrones y producir electricidad.

**ENTRADA:** RADIACIÓN SOLAR

**SALIDA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA

- Subsistema de regulación (regulador): Es el dispositivo que permite la correcta interacción entre el subsistema de captación y el subsistema de adaptación de corriente y el subsistema de almacenamiento. Su principal función es la de abrir y cerrar el circuito de conexión entre los paneles fotovoltaicos y las baterías dependiendo del nivel de carga de estas últimas.

**ENTRADA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA

**SALIDA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA

- Subsistema de adaptación de corriente (inversor): dependiendo del uso que se le vaya a dar a la energía eléctrica obtenida, será necesario un inversor, que tenga como función adaptar la corriente continua que generan los paneles fotovoltaicos a corriente alterna de uso común en electrodomésticos, equipos electrónicos, etc. Por ejemplo el uso de la corriente continua para la autonomía energética de las estaciones meteorológicas.

**ENTRADA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA

**SALIDA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE ALTERNA

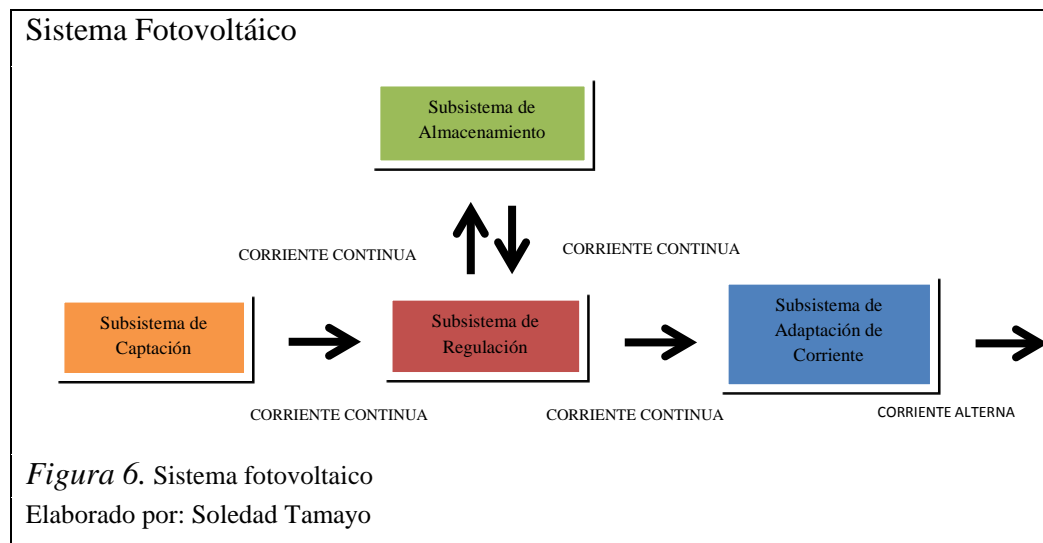
- Subsistema de almacenamiento (batería): permite almacenar la energía generada por los paneles fotovoltaicos para ser usada en momentos en que no existe radiación solar y es necesario el uso de electricidad. El sistema de almacenamiento es dimensionado dependiendo de las necesidades de abastecimiento de energía.

**ENTRADA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA

**SALIDA:** ENERGÍA ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA



En la Figura 6 se puede apreciar el sistema fotovoltaico y los subsistemas que lo componen.



## 1.2. El Sol

El sol es una estrella, su “radio es 109 veces mayor que el radio de la Tierra” (Timofeyev & Vasil'ev, 2008, pág. 13), este emite luz y calor que llega a nuestro planeta y tiene una directa e importante influencia en la salud humana, como: en el cáncer de piel y cataratas; en el clima por la variación del balance energético terrestre; en procesos biológicos como la fotosíntesis; procesos ecológicos como la alteración y modificación de ecosistemas y en procesos fotoquímicos para la formación y descomposición de contaminantes. La energía emitida por el sol ha sido desde siempre la más usada por la humanidad y por la naturaleza convirtiéndose en la mayor fuente de energía.

El uso de la energía que el sol proporciona presenta varias ventajas frente a las actuales formas de obtención de energía, ventajas como:

- Su uso no produce gases, desechos o efluentes contaminantes para el ambiente.
- Es una fuente inagotable de energía, en comparación con recursos limitados como el petróleo o el carbón.
- Es de fácil acceso, ya que la energía proveniente del sol incide sobre todo el planeta.

- Es un tipo de energía barata en comparación a otras fuentes de energía, como por ejemplo la energía nuclear.
- Es un tipo de energía que no subirá de precio ni será acaparada por determinados grupos, como el petróleo, carbón natural, etc.
- No contribuye al calentamiento global ni al cambio climático, ya que no genera CO<sub>2</sub>, vapor de agua o metano.

El sol emite energía que tiene un enorme potencial ya que a pesar de la gran cantidad de energía que es reflejada y absorbida por la atmósfera terrestre el “planeta recibe energía promedio a  $3 \times 10^{17}$  [KWh] al año, equivalente a 4000 veces el consumo del mundo entero en un año  $7 \times 10^{13}$  [KWh/año]” (Nandwani, 2005).

### 1.3. La atmósfera terrestre

Cada planeta en nuestro sistema solar posee su propia atmósfera, pero cada una de estas es diferente tanto en composición como en espesor. Las características de la atmósfera terrestre le otorgan propiedades óptimas para el desarrollo de la vida tal y como se conoce, que de otra manera no existiera, como sucede en los demás planetas del Sistema Solar.

Nuestra atmósfera ha sufrido transformaciones a lo largo de la vida del planeta es así que mientras en un principio era más densa y su composición era similar a la composición de los gases emanados por volcanes durante las erupciones, ahora es perfecta para el desarrollo de la vida, evitando que gases como el O<sub>2</sub> escapen. La atmósfera terrestre desarrolla un rol muy importante en la absorción de radiación, permitiendo que parte de la de radiación solar llegue y caliente la superficie de la Tierra y otra parte se refleje evitando daños en la salud, retiene el calor proveniente del sol haciendo un ambiente agradable para el desarrollo de la vida.

En la atmósfera terrestre encontramos aire el cual es esencial para la vida el cual se compone de 78% de nitrógeno y 21% de oxígeno el 1% restante se divide entre argón, dióxido de carbono, vapor de agua, etc.

La atmósfera se divide en 5 capas las cuales poseen sus propias características como por ejemplo la variación de temperatura entre capa y capa, más adelante se ilustra cada

capa y como la temperatura varía entre ellas con respecto a la altura.

#### 1.3.1. Tropósfera

Capa que se extiende desde la superficie terrestre hasta alrededor de entre 10 y 20 [Km] de altura pero esto cambia según la ubicación en la Tierra es así que en la parte ecuatorial puede llegar a tener un espesor de hasta 16 [Km]. En esta capa se concentra la mayor cantidad de masa de toda la atmósfera y es donde la vida se desarrolla, la temperatura en la tropósfera va decreciendo con la altitud. La tropósfera limita en la parte superior con la estratosfera en una zona denominada estratopausa.

#### 1.3.2. Estratósfera

Esta capa se extiende hasta los 50 [Km] de altura, en ella se encuentra la capa de ozono, la cual es la responsable de evitar que los rayos ultravioletas (UV) penetren y lleguen a la troposfera donde se desarrolla la vida. El ozono es un gas formado por átomos de oxígeno ( $O_3$ ), cuando la radiación ultravioleta llega a la capa de ozono rompe los enlaces de estos liberando oxígeno monoatómico (O) y oxígeno molecular ( $O_2$ ) que viajan por la estratósfera y se vuelven a recombinar formando nuevamente ozono, este proceso usa toda la energía de la radiación de onda corta (UVC), la radiación de onda media (UVB) es absorbida parcialmente y la radiación de onda larga (UVA) no se absorbe en la capa de ozono. En esta capa la temperatura aumenta con la altura, el límite superior se llama estratopausa.

#### 1.3.3. Mesósfera

Esta capa se extiende hasta los 80 [Km] de altura, en la mesosfera la temperatura desciende con la altura. El límite superior de esta capa se llama mesopausa.

#### 1.3.4. Termósfera

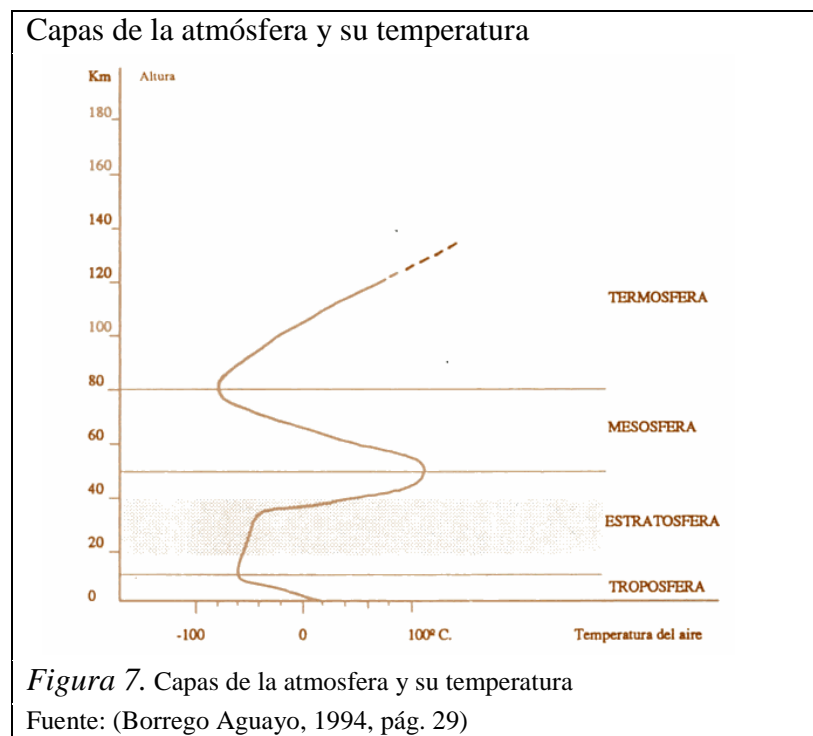
Es la capa más externa de la atmósfera terrestre, en esta parte de la atmósfera la temperatura asciende rápidamente con la altura por la absorción de longitudes de onda de la radiación como los rayos x, es en esta capa donde ocurre la aurora boreal. Esta capa se extiende hasta los 500 [Km].

#### 1.3.5. Exosfera

Es la parte más alta de la atmósfera en esta capa la fuerza de gravedad no actúa sobre los iones los cuales pueden escapar.

En la Figura 7 a continuación se observa gráficamente la variación de la temperatura con respecto a la altitud desde el nivel del suelo hasta los 1000 [Km] pasando por cada una de las capas de la atmósfera, no existe una relación constante entre la variación de la temperatura en cada capa.

Los efectos de la contaminación atmosférica pueden llegar a ser fatales, los gases que contaminan el aire son fácilmente transportados por las corrientes atmosféricas y causan daños a la salud de seres vivos.

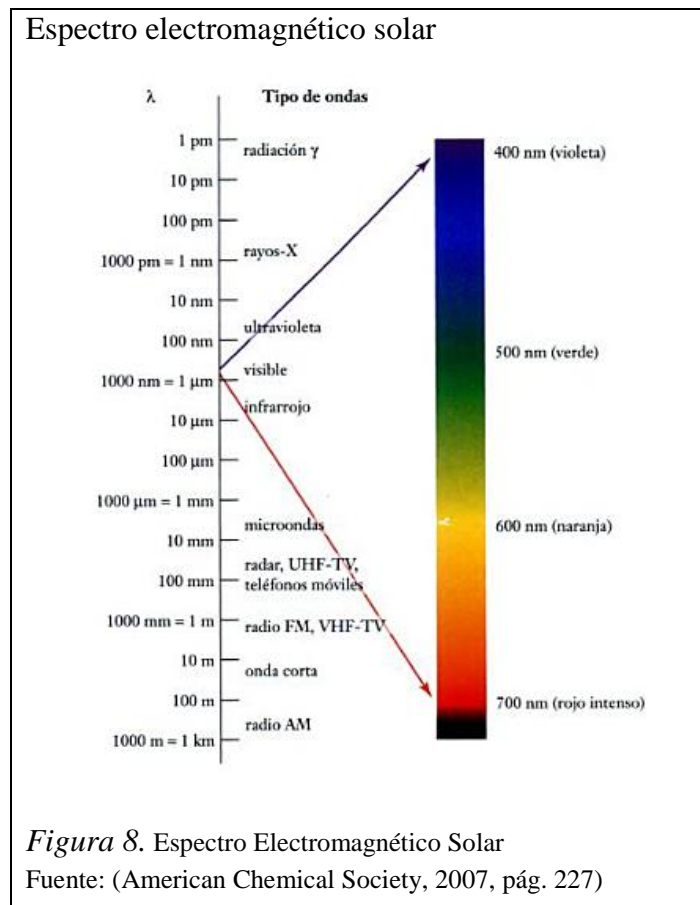


#### 1.4. Radiación solar

La radiación solar es la energía que se recibe del sol, es un flujo de fotones que viajan en forma de ondas electromagnéticas, las cuales no requieren de un medio de propagación, es decir, pueden viajar en el vacío.

Al tener la radiación una naturaleza ondulatoria, estas presentan varias longitudes de onda diferentes y el conjunto de estas forman el espectro electromagnético.

#### 1.4.1. Espectro electromagnético solar.



Del espectro electromagnético solar solo una pequeña parte es visible al ojo humano, esta es la comprendida entre 380 [nm] y 780 [nm] como se puede identificar en la Figura 8. Otras especies perciben longitudes de onda distintas, es así que las abejas pueden ver la radiación ultravioleta y esta capacidad les permite encontrar el polen de las flores y colaborar con la polinización llevando polen de una planta a otra necesario para la reproducción de plantas en la naturaleza. Las longitudes de onda menores a 380 [nm] corresponden al ultravioleta mientras que las mayores a 780 [nm] al infrarrojo.

Cada objeto tiene su propio espectro electromagnético, el cual depende de la radiación que absorbe y emite. El estudio del espectro de objetos ayuda a determinar propiedades físicas de los mismos.

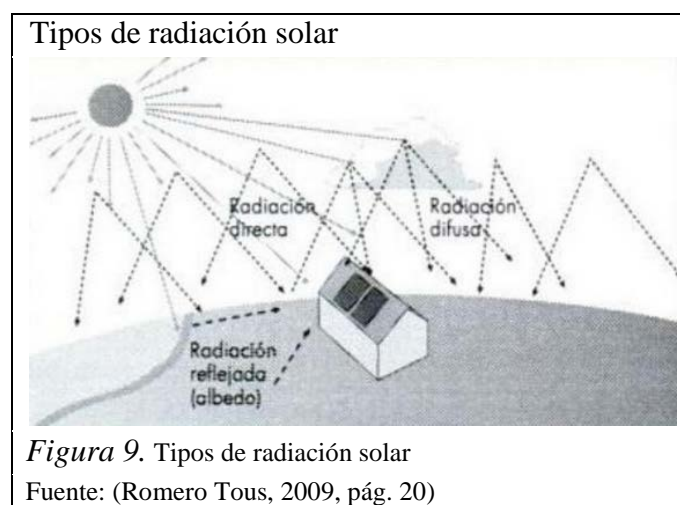
“El sol irradia un equivalente de energía igual a  $3,9 \times 10^{26}$  [W]” (Puig & Corominas, 1990, pág. 166). Pero debido a la gran cantidad de obstáculos que debe atravesar, la radiación solar que llega a la Tierra es mucho menor, ya que parte de la radiación es reflejada, parte es absorbida y parte re-irradiada.

“A la tierra sólo llega aproximadamente 1/3 de la energía total interceptada por la atmosfera, y ella el 70% cae en el mar. Aun así, es varios miles de veces el consumo energético mundial” (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2007, pág. 30).

“La potencia de la radiación solar, de forma genérica, se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000 [W/m<sup>2</sup>] en la superficie terrestre” (Fernández Barrera, pág. 9). Se pueden distinguir 3 componentes de la radiación solar:

- Radiación solar directa: es como su nombre lo indica la que llega desde el sol a la superficie terrestre directamente, con la menor cantidad de desvíos, y es la de mayor importancia para la generación de electricidad a partir de tecnología fotovoltaica.
- Radiación difusa: la radiación solar difusa sufre desvíos en su trayectoria desde el sol debido su paso por la atmósfera terrestre, donde encuentra obstáculos como: polvo, gases, vapor de agua, edificaciones, árboles, etc.)
- Albedo: es radiación solar que se refleja en la superficie de la Tierra. La radiación puede reflejarse varias veces en el entorno antes de llegar finalmente a un dispositivo solar fotovoltaico.

En la Figura 9 se observa los tipos de radiación solar.



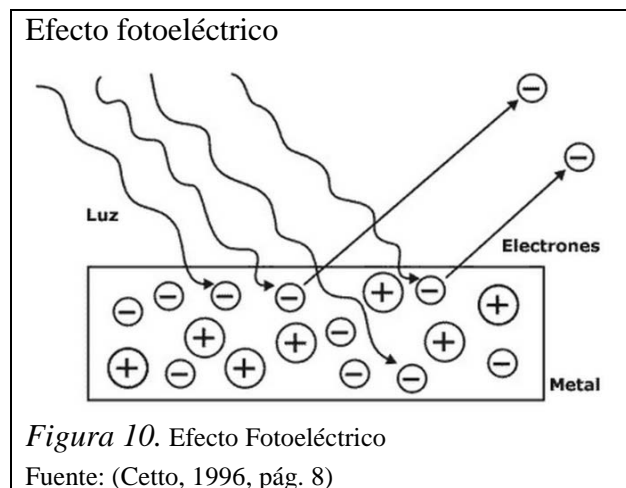
La suma de radiación directa y radiación difusa se llama radiación global, el dispositivo para medir la radiación global es el piranómetro, el cual mide radiación

solar usando la diferencia térmica entre una superficie negra que absorbe radiación y se calienta y una superficie blanca q refleja radiación.

### 1.5. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es la transformación de la radiación solar en corriente eléctrica. Cuando la radiación proveniente del sol (con suficiente energía) e incide en un material adecuado como un metal o un semiconductor, este material libera electrones los cuales fluyen y generan energía eléctrica, lo que se puede representar acorde a la Figura 10.

La frecuencia de la radiación incidente deber ser la adecuada para que los electrones fluyan, por ejemplo a una frecuencia de más de 780 [nm] (infrarrojo) los electrones no pueden fluir hasta que la frecuencia de la radiación se acerque más al ultravioleta, así la cantidad de electrones que fluyen es mayor. Mientras que la frecuencia es muy importante en el efecto fotoeléctrico la intensidad no tiene la misma importancia ya que si la radiación no tiene la frecuencia adecuada por más intensidad que tenga no habrá efecto fotoeléctrico. Una vez que la radiación emitida supera la frecuencia umbral es decir la mínima necesaria para arrancar electrones del material conductor, cuanto mayor sea la intensidad mayor será el flujo de electrones y mayor la corriente generada.



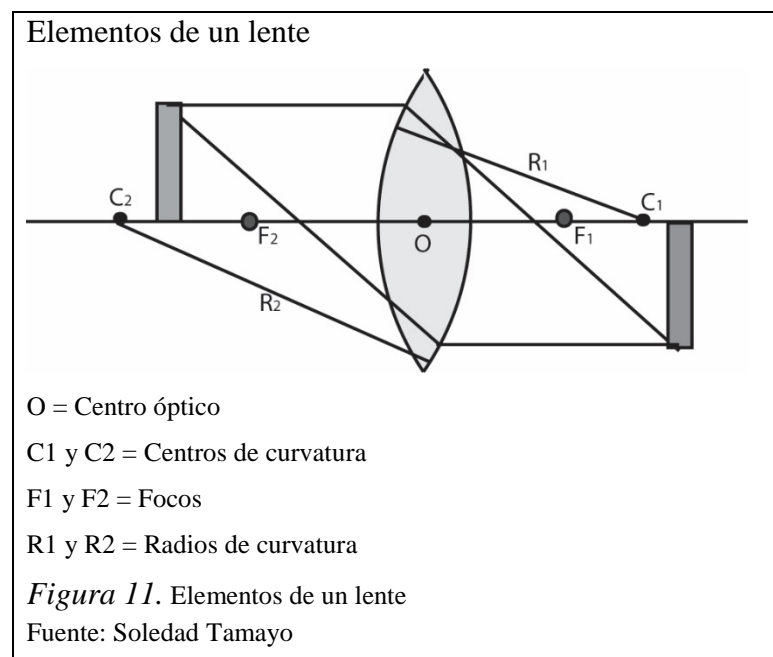
### 1.6. Lentes

Una lente es una pieza maciza transparente con dos superficies, de las cuales al menos una es curva, no poseen uniformidad pudiendo ser más delgadas en los bordes y más gruesas a medida que se acerca al centro y viceversa. El material más común para la

elaboración de lentes es el vidrio, pero también se los puede elaborar de acrílico.

Los elementos de una lente son los detallados a continuación y representados en la Figura 11:

- Centro óptico: al pasar un rayo de luz por el centro óptico este no sufre desviación alguna.
- Centros de curvatura: es el centro de la esfera o esferas que describen la curvatura de la lente.
- Eje: es la recta longitudinal que pasa por el centro óptico de la lente.
- Foco: punto donde se concentran todos los rayos de luz que pasan por la lente.
- Radio de curvatura: es el radio de la o las esferas que describen la lente.



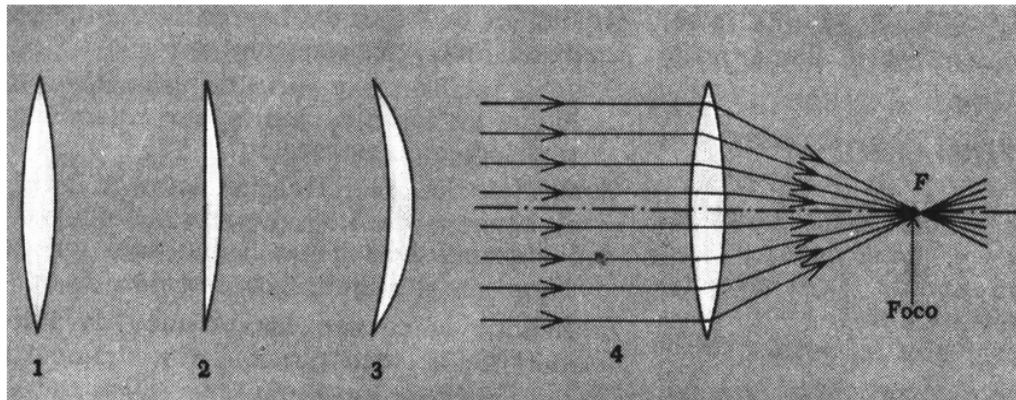
Los lentes se dividen en:

#### 1.6.1. Lentes convergentes.

También conocidos como lentes positivos, ya que al pasar rayos de luz paralelos por la lente se concentran después de atravesarla en un punto llamado foco como se observa en la Figura 12. Las lentes convergentes forman imágenes reales de los objetos y estas pueden ser: biconvexa, plano convexa y convexo cóncava o menisco convexo.



### Lentes convergentes



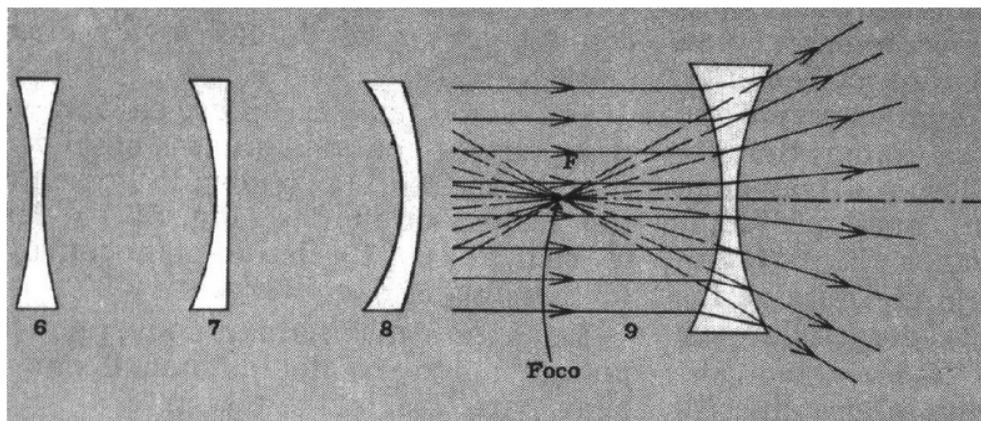
*Figura 12.* Tipos de lentes convergentes y su respectivo foco

Fuente: (Halliday & Resnick, 2001, pág. 97)

### 1.6.2. Lentes divergentes.

También conocidos como lentes negativos ya que los rayos paralelos de luz al pasar por la lente se separan ubicando al foco entre la fuente de luz y la lente como se observa en la Figura 13. Las lentes divergentes forman imágenes virtuales de los objetos, y estas pueden ser: menisco cóncava, plano cóncavo y bicóncavo.

### Lentes divergentes



*Figura 13.* Tipos de lentes divergentes y su respectivo foco

Fuente: (Halliday & Resnick, 2001, pág. 98)

## 1.7. Funcionamiento de proyectores de slides y retroproyectores

### 1.7.1. Proyector de slides.

Un proyector de slides consta de una lámpara, un espejo que concentra la luz en un haz, un ventilador que enfría la lámpara, lentes condensadoras y un carrusel que permite que las diapositivas roten una a una. El haz de luz atraviesa las diapositivas

primero y después las lentes para obtener una imagen proyectada en una superficie plana y blanca. La distancia focal puede regularse manualmente mediante una perilla hasta enfocar nítidamente la imagen.

#### 1.7.2. Retroproyector.

Un retroproyector consta de una lámpara, un ventilador que la enfría, un espejo reflector que forma y dirige el haz de luz que pasa por una lente convergente hasta la lente de Fresnel “El peso y volumen de una lente de gran diámetro puede reducirse construyéndola mediante segmentos anulares a diferentes ángulos, de modo que la luz procedente de un punto se ve refractada por los segmentos en un haz paralelo. Dicho sistema se denomina lente de Fresnel” (Mosca, 2007, pág. 982), sobre la cual se encuentra la superficie de proyección y la transparencia a proyectar, La lente de Fresnel vuelve a concentrar la luz y la dirige hasta la lente condensadora primero y al espejo proyector después para formar una imagen proyectada sobre una superficie.

### 1.8. Celdas fotovoltaicas

La unidad básica de un sistema fotovoltaico es la celda o célula fotovoltaica, el conjunto de células fotovoltaicas forma los módulos fotovoltaicos y a su vez el conjunto de módulos fotovoltaicos forman los paneles fotovoltaicos. Las celdas solares son dispositivos sensibles a la radiación solar de tal manera que absorben los fotones de ella y liberan electrones del material semiconductor del que están elaboradas, los electrones liberados fluyen y generan energía eléctrica.

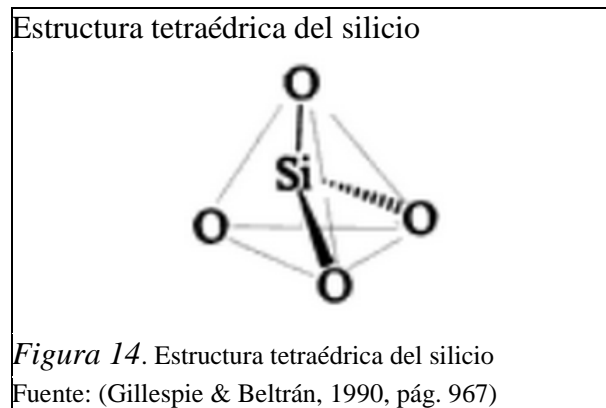
#### 1.8.1. Semiconductor.

Un semiconductor es aquel material que posee características intermedias entre un material conductor como metales y un material aislante como la madera. Este posee la característica especial de reaccionar de diferente manera ante diferentes estímulos externos como la temperatura, por ejemplo.

Los dos mejores representantes son el silicio y el germanio, y son estos los utilizados en la fabricación de celdas fotovoltaicas, pero también existen otros elementos semiconductores como el selenio. (Callister, 2007, pág. 624).

Los átomos de silicio y germanio son tetravalentes como se observa en la Figura 14,

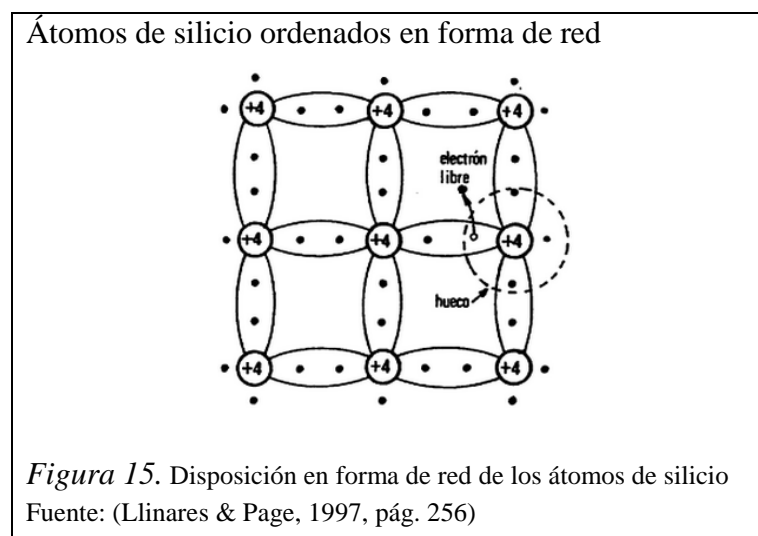
es decir poseen 4 electrones en su última orbita por lo que pueden formar estructuras tetraédricas, que le proporciona buenas características de semiconductor.



El silicio y el germanio pertenecen al grupo IV A de la tabla periódica y al tener 4 electrones de valencia cada átomo de silicio está unido mediante enlace covalente a otros cuatro átomos de silicio, formando una estructura cristalina otorgándole equilibrio al elemento.

#### 1.8.2. Funcionamiento celda fotovoltaica.

Cuando la radiación de la energía solar incide sobre un material semiconductor como el silicio, un electrón de la última capa salta dejando un hueco el cual es llenado por otro electrón que salta de otro átomo también dejando un hueco y así sucesivamente como lo observado en la Figura 15, logrando de esta manera que los electrones fluyan. El flujo de electrones es lo que se conoce como energía eléctrica.



#### 1.8.3. Tipos de celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas pueden clasificarse dependiendo de varias características, pero la clasificación que para el presente trabajo nos interesa es la siguiente:

a) Celdas fotovoltaicas rígidas de:

- Silicio monocristalino: elaboradas de silicio altamente puro, presentan una estructura interna muy ordenada que permite que los electrones fluyan libremente, su costo es alto debido a su complejidad de elaboración y a su rendimiento que oscila entre 15 – 18%.
- Silicio policristalino: también elaborado de silicio puro, de estructura interna ordenada por regiones, su costo es menor que el de silicio monocristalino debido a su rendimiento entre 12 – 14%.
- Silicio aformo: elaborado de silicio no de gran pureza, su estructura interna es desordenada, sus costos son bajos al igual que su rendimiento aproximado de 10%.

b) Celdas fotovoltaicas de película fina:

Como su nombre lo indica son celdas que constan de una delgada capa de un semiconductor, lo que le proporciona flexibilidad a la celda y le permite instalarse en gran variedad de superficies. Los materiales de los que se elaboran pueden ser: silicio, arseniuro de galio, telurio de cadmio, cobre, indio, galio y selenio. La fina capa de la que está compuesta este tipo de celda tiene un espesor de entre 1 – 2 [ $\mu\text{m}$ ].

c) Celdas fotovoltaicas sensibilizadas por colorante:

También conocidas como DSSC (del acrónimo Dye Sensitized Solar Cells). Este tipo de celdas fotovoltaicas simulan la fotosíntesis de las plantas las cuales usan la radiación solar y mediante la clorofila, que es un pigmento, generaran energía útil para ellas. Así es como este tipo de celdas usando un pigmento, sintetizado de elementos como rutenio, reacciona con la radiación solar y genera energía eléctrica.

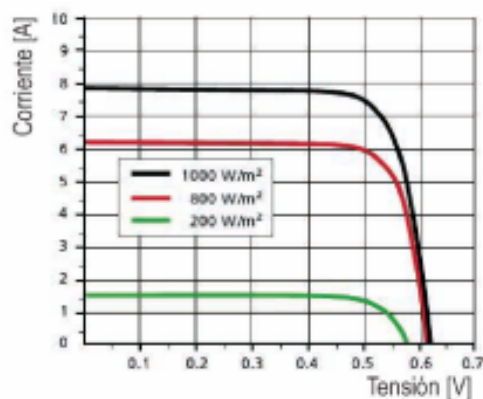
### 1.9. Curvas corriente – voltaje

Las curvas corriente – voltaje (I-V) no son más que la representación gráfica de la tensión versus la intensidad de un dispositivo fotovoltaico, al representar mediante una curva estos dos parámetros se puede observar con facilidad el comportamiento de

estos.

Las curvas I-V son necesarias para describir el funcionamiento de celdas fotovoltaicas. El comportamiento de las curvas I-V depende directamente de características como: temperatura, intensidad de radiación solar, etc., y debido a esto podemos estudiar características de dispositivos fotovoltaicos, es así que la variación de la curva I-V de una celda solar permite observar como la temperatura y la irradiación afectan su funcionamiento.

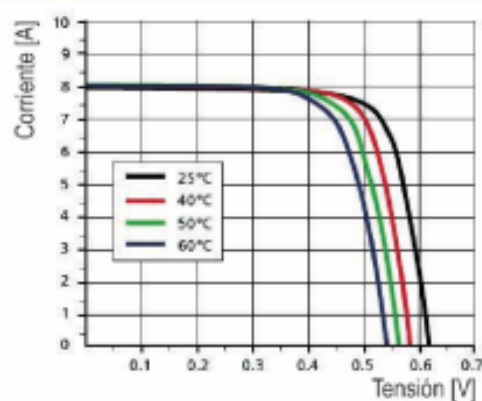
Curva I-V celda fotovoltaica a temperatura constante



*Figura 16.* Variación curva I-V con temperatura constante y diferentes intensidades de radiación de un módulo fotovoltaico

Fuente: (Moro, 2010, pág. 47)

Curva I-V celda fotovoltaica con irradiancia constante



*Figura 17.* Variación curva I-V con irradiancia constante y diferentes temperaturas un módulo fotovoltaico

Fuente: (Moro, 2010, pág. 47)

Graficando las curvas corriente voltaje se puede estudiar la relación entre estas dos variables y determinar si un dispositivos cumple o no con la ley de ohm. Obedecer la

ley de ohm es un propiedad que no todos los materiales poseen, los materiales óhmicos presentan un linealidad en sus curvas de corriente – voltaje y los no óhmicos una curva no lineal Una característica importante del efecto fotoeléctrico es que sucede solo en dispositivos no óhmicos, conocer si un material o dispositivo es óhmico o no óhmico se lo puede aprovechar y optimizar de mejor manera. En las Figuras 16 y 17 se puede observar 2 graficas de un dispositivo no óhmico para temperatura constante e irradiancia constante respectivamente.

## **CAPÍTULO 2**

### **GESTIÓN Y ANÁLISIS AMBIENTAL DEL RECICLAJE DE MATERIALES**

#### **2.1. Descripción de recursos**

Para la ejecución del presente trabajo se gestionaron recursos que permitirían obtener como resultado la construcción de un simulador solar para investigar el comportamiento de celdas fotovoltaicas de película fina, reciclando principalmente el juego óptico de proyectores en desuso, y otros materiales.

La gestión de recursos se dividió en 3 partes:

- Recurso material.
- Recurso humano.
- Ambiente de trabajo.

##### **2.1.1. Recurso material.**

Este numeral se refiere a los distintos objetos que se usaron en la construcción del simulador solar. Objetos como los proyectores de donde se obtuvieron los lentes que constituyen el simulador, etc. Cada uno de los objetos directamente involucrados se detallan más adelante en el apartado “Materiales para la construcción del Simulador Solar”

Sin embargo este ítem no solo se refiere a la gestión de objetos de donde se reciclan los materiales para la construcción del simulador solar como tal, sino también a las herramientas que facilitan las tareas a realizar durante el proceso de elaboración del simulador.

El laboratorio que se usó en la construcción del simulador, está equipado con gran variedad de herramientas, la Tabla 3 resume las herramientas y equipos con que cuenta el laboratorio de películas delgadas de la EPN. Para mayor detalle consultar el Anexo 1.

Tabla 3.  
*Resumen recurso material herramientas/equipos*

Herramientas / Equipos
Cajas vacías de equipos
Manuales de los equipos
Materiales de óptica
Equipos de medición y materiales
Materiales de celdas solares
Soluciones
Serigrafía
Cristalería
Equipos y materiales sobre la mesa
Otros materiales

Nota. Inventario del Laboratorio de Películas Delgadas de la EPN  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

#### 2.1.2. Recurso humano

El recurso humano se refiere a las personas que intervinieron de forma directa o indirecta en la construcción del simulador solar.

- Ph.D Cristian Santacruz ( Director laboratorio de Películas Delgadas EPN)
- Física María Cristina Calero ( Directora tesis)
- Soledad Tamayo (Autora presente tesis)
- Sr. Benítez & Sr. Calispa (Control de bienes EPN)

El recurso humano directamente involucrado en el la manipulación del simulador solar debe tener los conocimientos mínimos necesarios tanto del funcionamiento y de seguridad para su correcta operación.

#### 2.1.3. Ambiente de trabajo

El ambiente de trabajo para la realización del presente proyecto lo constituye el Laboratorio de Películas Delgadas (ver Figura 18) ubicado en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional a cargo del Dr. Cristian Santacruz, en donde se llevó a



cabo la gestión para la obtención de los proyectores de los cuales se reciclaron los juegos ópticos usados en la construcción del simulador solar. En el Laboratorio de Películas Delgadas se realizaron las pruebas, ensayos, toma de medidas, tratamiento de datos, consulta de información, etc., respectivas y necesarias para la ejecución del presente trabajo.

El ambiente de trabajo para la construcción del simulador solar como se mencionó anteriormente es el Laboratorio de Películas Delgadas de la EPN, el laboratorio cuenta con mesas de trabajo, toma corrientes de 110 [V] y 220 [V], purificador de agua (útil para abastecer a la columna de agua del simulador solar), herramientas, computadoras, persianas en las ventanas (para obscurecer el ambiente de trabajo y evitar que la luz del medio interfiera en el simulador), espacio suficiente, iluminación adecuada (natural y artificial), puerta de acceso, gabinetes. Además de condiciones de seguridad como puerta metálica exterior, piso sin desnivel, techo alto, ventanas, extintores y botiquín

Laboratorio de Películas Delgadas



*Figura 18.* Laboratorio de Películas Delgadas de la Escuela Politécnica Nacional  
Fuente: Soledad Tamayo

## 2.2. Gestión para la obtención de los materiales del simulador solar

En la construcción del simulador fue necesario realizar la adecuada gestión para obtener cada uno de los materiales involucrados, que constó principalmente en la

búsqueda, obtención de los aparatos a reciclar los elementos que constituirán el simulador y de los procedimientos de adquisición de los mismos.

El detalle de dicha gestión se puede encontrar en la Tabla 4 y Tabla 5 a continuación.

Tabla 4.  
*Gestión de materiales*

Material	Actividades realizadas	Institución / establecimiento	Observaciones
Lentes (Proyectores)	Búsqueda de proyectores bodegas EPN	EPN	
	Carta dirigida al departamento de control de bienes, solicitando los proyectores		
	Traslado de proyectores a laboratorio		
	Revisión de información sobre estructura interna de un proyector		Para evitar dañar los lentes al retirarlos de los proyectores
	Obtención de lentes de los proyectores		
Lentes (Cámaras Fotográficas y binoculares)	Búsqueda de las cámaras fotográficas	Casa	
	Revisión de información sobre estructura interna de una cámara fotográfica		
	Obtención de lentes de las cámaras fotográficas		
Lámpara Incandescente	Información de los posibles lugares donde se usan lámparas incandescentes con características deseadas	Casa	De uso doméstico
	Búsqueda de lámparas incandescentes en los posibles lugares donde estas suelen usarse		Usadas para alumbrar campanas de extracción de cocinas
	Adquisición de la lámpara incandescente		De 55 vatios, 12 voltios en el tamaño más pequeño posible
Lámpara de Xenón	Información de posibles lugares donde se usan lámparas de xenón con características deseadas	Mecánica Automotriz	De uso en mecánica automotriz
	Búsqueda de lámpara de xenón según investigación de los posibles lugares donde se usan		En faros de autos tuneados
	Adquisición de lámpara de xenón		De 6000 [°K] color de temperatura y 12 voltios
Columna de Agua	Información posibles lugares de fabricación	Vidriería	Vidrierías

	Varios ensayos hasta determinar las dimensiones de la columna		A mayor tamaño mayor absorción de radiación
	Adquisición de columnas de agua para ensayos		Se fabricaron 5 columnas en varios tamaños
	Elección de la columna de agua más adecuada		La que permitió absorber radiación sin perder demasiada potencia
Filtro Azul UV	Información de posibles lugares donde encontrar el filtro con características deseadas	ESPE	
	Solicitud para el préstamo del filtro		Préstamo ESPE
Fuente de poder	Solicitud préstamo fuente de poder con características deseadas	EPN	Préstamo EPN
Rieles	Información de posibles lugares donde se usan rieles	Casa	Uso domestico
	Reciclaje de rieles usadas en muebles		Viejos cajones de un mueble en desuso
Soportes de lentes	Información de posibles lugares de fabricación	Carpintería	Carpinterías
	Después de varios ensayos, determinación de dimensiones de los soportes		
	Adquisición de soportes para los lentes		Los definitivos en madera

Nota. Actividades realizadas en la gestión de los materiales.  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

### 2.3. Materiales para la construcción del simulador solar

Se involucró varios materiales en la construcción del simulador solar, de estos, no todos finalmente formaron parte del producto final, sin embargo por la importancia que tuvieron al momento de los ensayos es necesario mencionarlos y acotar las razones por cuales no fueron finalmente implementados (ver Tabla 5).

Tabla 5.  
*Materiales del simulador solar*

Material	Observaciones
Lentes	Lentes de cámaras fotográficas que fueron posteriormente descartadas, juego óptico reciclado de proyectores (el tiempo de uso promedio del proyector es de 20 años) que forman parte del simulador solar.

Lámpara halógena	La cual otorga la mayor cantidad del espectro del simulador, específicamente del visible y el infrarrojo.
Lámpara xenón	Aporta la mayor cantidad del espectro ultravioleta en las pruebas y ensayos previos al que fue el simulador definitivo.
Leds	Aporta frecuencias definidas en el espectro del simulador solar definitivo
Columna de agua	Absorbe radiación y simula la humedad del medio, se ensayaron 5 columnas de agua con diferentes dimensiones a lo largo de las pruebas hasta llegar a la que fue la definitiva.
Área de incidencia del espectro	Es el área donde se obtiene la simulación del espectro solar (2.25 cm <sup>2</sup> ).
Soportes lentes	En las pruebas, ensayos y en el simulador definitivo aportó soporte a los componentes, (lámparas, lentes, columna de agua y área de incidencia), se usó varios tipos de soportes hasta encontrar los más adecuados.
Rieles	En las pruebas, ensayos y el simulador definitivo proporcionó fijación a los componentes, (soporte lámparas, soporte lentes, soporte columna de agua, área de incidencia)
Fuente de energía	La fuente de energía para el simulador varió conforme se hicieron las pruebas y ensayos, desde una batería de automóvil hasta las dos fuentes de energía que alimentan el simulador definitivo.

Nota. Características de los materiales involucrados en el simulador.  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

A continuación se describe cada uno de los materiales usados en la construcción del simulador solar mencionando su definición, su uso y su descarte de ser el caso en la ejecución del proyecto.

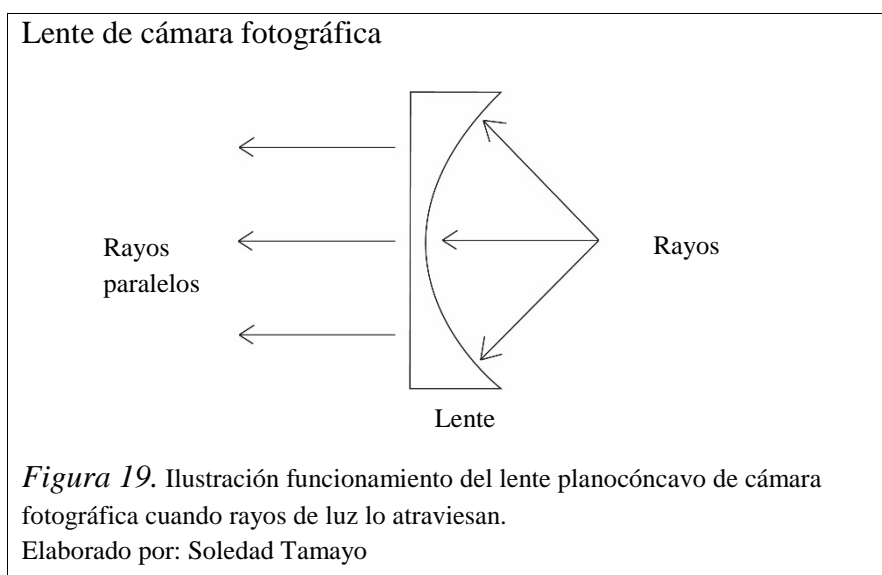
### 2.3.1. Lentes

El simulador solar usa lentes convergentes, de vidrio transparente atóxico con el fin de que los lentes puedan soportar la temperatura de la lámpara sin sufrir daños.

Los lentes necesarios para la construcción del simulador solar pueden ser de múltiples orígenes, pudiendo ser lentes que se venden comercialmente, o lentes de cualquier aparato que contenga un juego óptico para su funcionamiento. Para el presente trabajo se reciclaron lentes de aparatos como cámaras fotográficas analógicas en desuso, binoculares dañados, y lentes de proyectores de slides y retroproyectores siendo estas

últimas las utilizadas finalmente el simulador solar, debido a su tamaño y distancia focal.

De los lentes obtenidos de cámaras fotográficas se obtuvo uno plano cóncavo ilustrado en la Figura 19, de dimensiones: 2.3 [cm] x 1.6 [cm] x 0.4 [cm], el cual en primera instancia se creyó optimo ya que la parte cóncava recibe las ondas de radiación y la parte plana las convierte en un rayo paralelo, pero al ser un lente muy pequeño tenía una distancia focal muy corta (1,6 [cm]) la cual no permitía transmitir potencia requerida para el simulador solar.



De igual manera sucedió con los demás lentes pequeños obtenidos de otros aparatos y 3 de los lentes del proyector de slides, al ser lentes pequeños, tenían distancias focales pequeñas y no se logró la potencia necesaria para simular el espectro solar. De tal manera que tuvieron que ser descartados.

Los lentes que son parte del simulador solar definitivo son aquellos de mayores dimensiones, en el capítulo 3 “caracterización de los lentes” se detallan sus dimensiones así como sus distancias focales. Estos lentes poseen un tamaño y distancia focal que permite mantener la potencia que el simulador solar requiere para reproducir el espectro del sol. En las Figuras 20, 21, 22 y 23, se puede apreciar los lentes de los distintos aparatos que fueron reciclados.

Lentes de proyectores



*Figura 20.* Lentes grandes obtenidos de proyectores de slides y retroproyectores  
Fuente: Soledad Tamayo

Lentes de proyector de slides



*Figura 21.* Lentes pequeñas obtenidos de proyector de slides  
Fuente: Soledad Tamayo

Lente de cámara fotográfica



*Figura 22.* Lente plano-cóncava obtenido de cámara de fotos  
Fuente: Soledad Tamayo

Lentes de cámaras fotográficas y proyector de slides



*Figura 23.* Lente pequeñas de cámaras de fotos y proyector de slides  
Fuente: Soledad Tamayo

### 2.3.2. Lámparas

Entre los materiales para la construcción del simulador se usaron inicialmente 2 lámparas, una halógena y una de xenón, las cuales combinadas proporcionarían la radiación necesaria para la simulación de radiación solar, sin embargo posteriormente la lámpara de xenón fue reemplazada por leds.

- Una lámpara halógena de 12 [V] y 55 [W] de potencia.
- Y una lámpara de xenón de 12 [V] y 6000 [K°] de temperatura de color.

- 26 leds de varios colores (violeta, azul, verde y naranja).

a) Lámpara de xenón

Comúnmente utilizada en la modificación de faros de automóviles (tuning), es necesario comentar que en el Ecuador están prohibidos los faros de xenón de ciertas temperaturas de color, ya que es considerado contravención leve de primera clase con multa del 5% de una remuneración básica y reducción de 1,5 puntos de la licencia de conducción a aquellas personas que instalen faros neblineros sin autorización. Las lámparas de xenón son muy utilizadas como faros neblineros por ser más luminosas que las lámparas halógenas comunes de los automóviles y dependiendo del color de temperatura varía de color desde luz amarilla intensa, luz amarilla tenue, celeste, azul y morada, lo que hace que el uso de estas provoque deslumbramiento al resto de automóviles en las vías. Al ser, ciertas lámparas de xenón prohibidas en el Ecuador encontrar la adecuada para el simulador solar se hace difícil sin embargo es posible conseguirlas en tiendas especializadas en tuning de automóviles.

En una lámpara de xenón “La luz se genera por medio de un arco voltaico de hasta 30 [KV], entre dos electrodos tungsteno situados en una cámara de vidrio, cargada con gas xenón y sales de metales halogenizados” (López Cárdenas & Dávila Marín, 2011, pág. 40).

En las primeras pruebas y ensayos se usó la combinación de radiación de una lámpara halógena y una lámpara de xenón pero esta última tuvo que ser descartada ya que presenta alta intensidad en la parte ultravioleta del espectro, intensidad que no se adecua a la intensidad requerida para simular el espectro solar.

Lamparas Halogenas y de Xenón



*Figura 24.* Lámpara de xenón (a) y lámparas halógenas (b)  
Fuente: Soledad Tamayo

#### b) Lámpara halógena

Este tipo de lámparas son muy comunes actualmente ya que presentan ventajas como mejor brillo y mayor vida útil que las lámparas incandescentes, estas se las puede encontrar en varios tamaños y formas las cuales dependen del uso que se les dé (automotriz, comercio, decoración, hogar, etc.) para el simulador solar se usó una lámpara de pequeño tamaño con filamento horizontal de tungsteno, rodeados de un gas halógeno (yodo o bromo) que reacciona con él cuando este se calienta. En la Figura 24 se observan los 2 tipos de lámparas halógenas que se usaron en las pruebas y ensayos, la lámpara de la izquierda más grande se descartó por su tamaño y por la orientación del filamento, es la lámpara pequeña de la derecha la que finalmente forma parte del simulador por su tamaño, potencia y su filamento horizontal.

#### c) Led (diodo emisor de luz)

Led significa diodo emisor de luz el cual tiene la característica de ser conductor en sentido ánodo – cátodo y no en sentido contrario. La luz que emite es monocromática es decir radiación electromagnética en una pequeña longitud de onda que determina el color del led.

Los led emiten luz en un intervalo determinado de frecuencia debido al material semiconductor del que están constituidos basados en el efecto fotoeléctrico, es decir que al hacer pasar corriente por el material semiconductor las cargas positivas se unen a las negativas pero, ya que las positivas tienen menor energía que las negativas estas últimas deben perder energía para combinarse con las positivas, esta pérdida de energía se manifiesta como luz.

Los led usan combinaciones de elementos químicos para emitir un color determinado de luz, la Tabla 6 resume estos.

Tabla 6.

*Combinaciones de elementos químicos de un led*

Combinaciones	Color	Longitud de onda
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940[nm]
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rojo e infrarrojo	890[nm]
Arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	Rojo, naranja y amarillo	630[nm]



Fosfuro de galio (GaP)	Verde	555[nm]
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525[nm]
Seleniuro de zinc (ZnSe)	Azul	
Nitruro de galio e indio (InGaN)	Azul	450[nm]
Carburo de silicio (SiC)	Azul	480[nm]
Diamante (C)	Ultravioleta	
Silicio (Si)	En desarrollo	

Nota. (Gago & Fraile, 2012, pág. 20)  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

El simulador solar definitivo usa un arreglo de 26 luces led dispuestas en el perímetro de un círculo, que rodea el haz de radiación del simulador, este aporte y mejora al espectro al simulador solar fue realizado por el Dr. Cristian Santacruz quien después de estudiar y revisar a fondo el simulador concluyó el cambio de la lámpara de xenón por el arreglo led mencionado.

### 2.3.3. Columna de agua

La humedad en la atmósfera provoca, que parte de la radiación solar sea absorbida, por lo tanto se ve modificada por ella. Para simular el vapor de agua de la atmósfera se requiere de una columna de agua (ver Figura 25), la cual absorberá parte de la radiación emitida por la lámpara halógena provocando que la radiación del simulador se parezca más a la radiación emitida por el sol.

La columna de agua no es más que un cubo rectangular con paredes delgadas de vidrio transparente con en su interior contiene agua pura. Se probaron 5 diferentes tamaños de columnas de agua y la que se usó definitivamente en el simulador es la que se observa en la Figura 25 de dimensiones 8 [cm] x 11 [cm] x 5 [cm].

Columna de agua



*Figura 25.* Columna de agua

Fuente: Soledad Tamayo

#### 2.3.4. Filtro

La radiación solar al atravesar las capas de la atmósfera pierde radiación llegando a la Tierra con niveles tolerables de UV. Para filtrar parte de la radiación UV emitida por la lámpara de xenón se requiere de un filtro el cual se puede observar en la Figura 26, el cual ayudará a absorber UV y obtener rangos del espectro del ultravioleta parecido a los de la radiación solar.

Al descartar de la lámpara de xenón del simulador solar se descartó también el uso de un filtro azul. Sin embargo fue usado en alguna de las pruebas y ensayos.

Filtro azul UV



*Figura 26.* Filtro Azul

Fuente: Soledad Tamayo

#### 2.3.5. Fuente de alimentación

El dispositivo que provee de energía al simulador solar, en primera instancia a las lámparas de xenón y halógena y posteriormente solo a la lámpara halógena es una fuente de poder. Otra de 12 [V] y 30 [A] suministra energía al arreglo de luces led.

En los primeros ensayos se usó una batería de automóvil para encender las lámparas de xenón y halógenas como se muestra en la Figura 27, pero por seguridad y requerimientos posteriores se usaron 2 fuentes de poder, las cuales brindan ventajas como la manipulación del voltaje y amperaje que influye directamente en la intensidad de la radiación emitida por la lámparas, (ver Figuras 28 y 29).

Batería de automóvil



*Figura 27.* Batería de automóvil que en un inicio proporcionó energía a las lámparas

Fuente: Soledad Tamayo

Fuente de poder DC



*Figura 28.* Fuente alimentación lámpara halógena

Fuente: Soledad Tamayo

Fuente de poder



*Figura 29.* Fuente alimentación luces led  
Fuente: Soledad Tamayo

### 2.3.6. Soportes y rieles

Los soportes son estructuras que sostienen en una posición determinada a cada componente del simulador, para el presente caso en posición vertical, las lámparas, lentes, columna, filtro, etc., todas las partes que componen el simulador se ubican a una misma altura y secuencialmente.

Los soportes se fijan a los rieles los cuales son móviles permitiendo modificar la distancia a la que se ubica cada una de las partes del simulador (ver Figuras 30 y 31). En pruebas y ensayos se usaron rieles del laboratorio y rieles recicladas de cajones de escritorios, para el simulador final cada parte del simulador esta fija a una riel cilíndrica sostenida por nueces metálicas que al ajustarse mantienen inmóviles las piezas (ver Figura 32).

Rieles para pruebas y ensayos



*Figura 30.* Rieles metálicos del laboratorio  
Fuente: Soledad Tamayo



*Figura 31.* Rieles recicladas  
Fuente: Soledad Tamayo

### Rieles para pruebas y ensayos



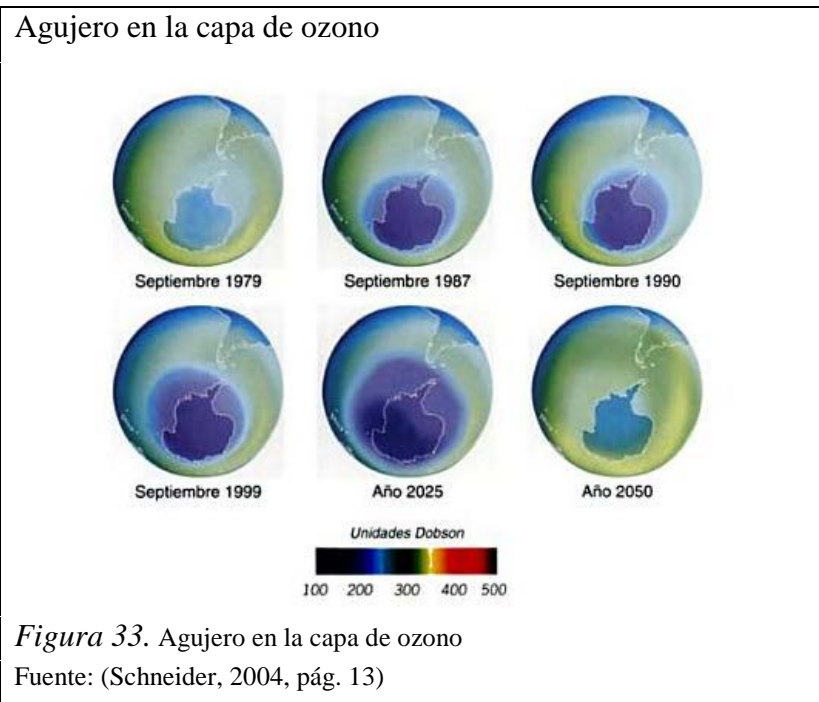
*Figura 32.* Riel y nueces en el simulador definitivo

Fuente: Soledad Tamayo

#### 2.4. Posibles aplicaciones ambientales del simulador solar

La principal aplicación del simulador solar es la investigación, el desarrollo, la caracterización y optimización de las celdas solares tipo película fina y en general cualquier tipo de celdas fotovoltaica, sin embargo no es la única, las aplicaciones que se pueden dar a un simulador solar son variadas y dependen del uso y del área en el que se requiera usar radiación solar.

Los contaminantes ambientales como los CFC (clorofluorocarbonos), gases de efecto invernadero entre otros dañan la capa de ozono (ver Figura 33), importante filtro de radiación solar del planeta, provocando el aumento en la intensidad y el paso de longitudes de onda de radiación solar que afectan la vida en el planeta.



Cuando nos referimos a ambiente nos referimos al medio donde encontramos seres vivos (animales, plantas, seres humanos, etc.) elementos naturales y artificiales que se relacionan entre ellos y se ven afectados por acciones antropogénicas. Es por eso que al hablar de ambiente nos referimos a todos y a cada uno de los elementos antes mencionados.

A continuación se mencionan algunas posibles aplicaciones ambientales para un simulador solar.

#### 2.4.1. Aplicación del simulador solar para el crecimiento de plantas

Las plantas requieren de radiación solar para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis del cual obtienen energía útil para ellas y fijan carbono del CO<sub>2</sub> del ambiente para formar tejidos vegetales. Con la ayuda de un simulador solar se puede investigar los efectos de la radiación solar sobre el crecimiento y germinación de plantas y los mecanismos que las plantas usan para protegerse de las diferentes longitudes de onda del espectro de radiación solar.

La radiación solar afecta positivamente o negativamente el crecimiento de una planta tal es así que la acción fotosintética es variada dependiendo de la longitud de onda de radiación solar que reciba una planta y de los pigmentos complementarios ( $\beta$ -caroteno, xantofila, etc.) que la planta contenga. Una planta que recibe radiación solar intensa y

prolongada se ve afectada en sus procesos biológicos pudiendo impedir que la planta se desarrolle, reproduzca e incluso provocando su marchites y muerte.

La capa de ozono se ve afectada por contaminantes de origen antropogénico, los cuales la debilitan y provocan que mayor cantidad de radiación UV (ultravioleta) llegue a la atmósfera terrestre. Con la ayuda de un simulador solar se puede reproducir estas condiciones y estudiar los mecanismos que las plantas adoptan para protegerse del exceso de radiación UV que puedan recibir.

#### 2.4.2. Aplicación del simulador solar para estudios de efectos de radiación solar en la salud.

En dermatología los simuladores solares son muy útiles para realizar los test de piel y las dosis de eritema que la piel soporta, esto consiste en radiar la piel con radiación solar proveniente de un simulador controlando la intensidad y tiempo de exposición para observar cuanto demora la piel en enrojecerse (eritema), y así encontrar los umbrales eritemáticos específicos para cada individuo dependiendo de su edad, estado de salud y tipo de piel.

Para determinar la “radiación de quemadura solar” también se utiliza simuladores solares calibrados a la región del ultravioleta, de esta manera se estudia en que rangos de radiación UV expuestas en la piel causan daños como quemaduras. Los índices UV son la cantidad de irradiancia que puede causar quemaduras en la piel. Índice UV igual a 1 implica que la densidad de energía recibida es 25 [mW] por metro cuadrado 25 [mW/m<sup>2</sup>] (Sbarato D., Sbarato V. & Ortega J.).

La radiación solar en los ojos humanos causa lesiones que pueden ir desde inflamación ocular, quemaduras, cataratas y ceguera. En el estudio de la prevención de enfermedades y daños en ojos derivados de la exposición a radiación solar un simulador solar es útil ya que con este se puede estudiar la cantidad de radiación solar que los ojos pueden recibir.

El cuerpo humano produce vitamina D que ingiere en los alimentos gracias a la acción de la radiación solar que recibe durante el día. Es decir que niveles moderados de radiación solar benefician la salud de las personas. Así mismo las dosis controladas de radiación solar ayuda a evitar el raquitismo en niños. Para la investigación de los

factores beneficio/riesgo solar, es decir que cantidad de radiación es necesaria para mantener una buena salud y a partir de que cantidad de radiación es perjudicial, un simulador solar ayuda en esta determinación.

#### 2.4.3. Aplicaciones del simulador solar en el ámbito industrial

Para la elaboración de productos con factor de protección solar tan variados y específicos para cada tipo de piel, es necesario hacer pruebas previas que determinen como debe comportarse un protector solar dependiendo de la cantidad de radiación solar existente en el medio en el que se lo vaya a usar, para estos estudios se utilizan simuladores solares.

En la elaboración de gafas que protejan los ojos de la radiación solar que pueden causar daños, se requiere de un simulador solar que permita estudiar diferentes materiales para la producción de gafas y lentes, tanto cosméticas como para la salud.

En la desinfección y esterilización de alimentos que llegan a supermercados, se utiliza simuladores de radiación solar que irradian radiación ultravioleta, destruyendo microorganismos que pueden afectar la salud y de esa manera obtener un producto adecuado para ser comercializado y consumido por la gente.

#### 2.5. Análisis ambiental del reciclaje de materiales para construir el simulador solar.

Los residuos generados de actividades antrópicas causan impactos ambientales por lo general negativos para el ambiente, en especial si no hay una disposición adecuada de estos residuos.

Los proyectores de slides y acetatos que solían ser muy usados en años anteriores mayormente en la docencia, hoy han sido reemplazados por proyectores mucho más eficientes, cómodos de manipular, transportar y acordes a la tecnología actual. Este avance tecnológico ha hecho que muchos proyectores de slides y acetatos al presentar daños de funcionamiento sean descartados ya que adquirir uno nuevo de última generación es más barato y cómodo que arreglar uno antiguo.

Se reciclaron 3 proyectores que no se usaban, y que se encontraban confinados en las bodegas de la EPN ocupando e inutilizando espacio. De un aparato electrónico dañado que no se puede reparar, sus componentes y partes pueden ser usados para reemplazar



otros de dispositivos similares y así arreglarlos, sin embargo al no usarse más este tipo de aparatos no se justifica guardar los descompuestos y dañados.

Con el reciclaje se busca evitar impactos negativos en componentes ambientales: agua, suelo, aire, flora, fauna y componente socio-económico. Reciclar presenta varias ventajas ambientales como:

- Evita que los rellenos sanitarios se saturen y se llenen innecesariamente de residuos que podrían tener una segunda oportunidad y convertirse en materiales para diversos usos. En el presente caso se reciclaron lentes de vidrio, de los proyectores, rieles, lámparas halógenas de cocina y tableros de madera.
- Reciclar residuos en especial residuos tecnológicos evita que sustancias nocivas lleguen al suelo y al agua contaminando el ambiente, para la construcción del simulador solar se usaron los lentes de vidrio que de otra manera podrían haber terminado en un relleno sanitario y demorado en degradarse muchos años.
- Al reciclar se contribuye a la reducción del efecto invernadero y de su principal consecuencia el calentamiento global, se considera que ninguna esfuerzo por reciclar es pequeño en la lucha para preservar el medio.
- Con el reciclaje de estos materiales para la construcción de un simulador solar a nivel de laboratorio que puede ser usado en la caracterización de celdas fotovoltaicas nos apegamos al cambio de la matriz energética que busca reemplazar las energías convencionales por otras menos contaminantes y no dependientes del petróleo.
- Implícitamente el reciclaje (no importa a que escala) ayuda a crear una cultura ambientalmente responsable en las personas involucradas en el reciclaje de residuos.
- El reciclaje en nuestro país involucra una gran cantidad de mano de obra y se ha vuelto una manera de obtener dinero para personas que ha convertido el reciclaje en su sustento diario.

Hay materiales que presentan mayor resistencia a la degradación que otros a continuación una tabla que expone los tiempos de degradación de los componentes

que se reciclaron para la construcción el simulador solar.

Tabla 7.

*Tiempo de degradación de materiales reciclados*

MATERIAL	TIEMPO DE DEGRADACION	OBSERVACIONES
Lentes de vidrio	4 000 años	Dependiendo del grosor del objeto de vidrio el tiempo de degradación puede demorar más.
Rieles metálicas	Más de 450 años	A 10 años de estar el acero expuesto al ambiente empieza a degradarse de y ahí continua degradándose por cientos de años.
Lámpara halógena	Más de 4 000 años	Al ser la lámpara un objeto heterogéneo compuesto de vidrio, metal, elemento halógeno, etc., tendrá una degradación gradual de cada uno de ellos. Unos elementos demoraran más que otros en degradarse.
Tablero de madera	De 2 a 3 años	La madera es un elemento que degrada rápidamente en comparación con la mayoría de residuos sólidos su degradación promedio es de 2 a 3 años pero dependiendo de las condiciones puede demorar hasta 15 años.

Nota. (Ecología: Ciencia Popular, 2012, pág. 1).  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

## 2.6. Análisis financiero

Actualmente para caracterizar dispositivos fotovoltaicos se puede encontrar simuladores solares que se comercializan con valores desde 2500 USD a 21900 USD aproximadamente dependiendo de las características requeridas, por lo que este proyecto a más de tener un enfoque ambiental tiene un enfoque financiero dado que el ahorro podría llegar a un 88 % aproximadamente del costo frente a los productos ofertados en el mercado, y a un 70% aproximadamente del costo real gracias a que ocupa en su mayoría materiales reciclados.

A continuación un desglose de los materiales y sus respectivos costos para la elaboración del simulador.

Tabla 8.  
Costo de materiales

MATERIAL	ORIGEN MATERIAL	COSTO REAL	COSTO PARA EL ESTUDIO
Lentes (Proyectores de slides)	EPN (material reciclado de proyectores en desuso)	\$ 80,00	\$ 0,00
Lámpara halógena	Casa (material reciclado de la campana de extracción de cocina)	\$ 4,00	\$ 0,00
Lámpara de Xenón	Tienda de mecánica automotriz	\$ 150,00	\$ 150,00
Columna de Agua	Vidriería	\$ 40,00	\$ 40,00
Fuente de alimentación lámpara halógena	EPN (préstamo)	\$ 500,00	\$ 0,00
Fuente de alimentación para luces led	Tienda de productos electrónicos	\$ 50,00	\$ 50,00
Rieles	Casa (recicladas de un mueble)	\$ 30,00	\$ 0,00
Soportes de lentes	Carpintería	\$ 30,00	\$ 30,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 884,00</b>	<b>\$ 270,00</b>

Nota. Precios de mercado para los costos reales.  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

### **CAPÍTULO 3**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SIMULADOR SOLAR**

### **3.1. Diseño del simulador solar**

#### **3.1.1. Teoría del diseño del simulador solar**

Según Georgescu, Damache y Gîrțu autores del paper “Class A small area solar simulator for dye-sensitized solar cell testing” es posible iniciar el diseño de un simulador solar a partir de la superposición del haz de lámparas halógena y xenón de ciertas características, los haz de radiación de las lámparas se concentran y dirigen con la correcta disposición de lentes ópticos. Se entiende que cada lámpara aporta con un intervalo del espectro solar (comprendido entre 340 [nm] y 740 [nm]) y que la combinación de estas dará como resultado el espectro esperado.

La información obtenida de este paper marca el inicio de lo que será el diseño del simulador solar sin embargo, después de varias pruebas el simulador va tomando un diseño propio que se adapta mejor tanto al medio de trabajo como a los materiales disponibles.

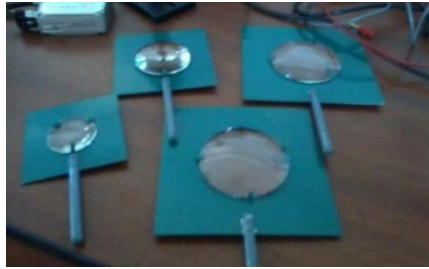
Para el diseño del simulador solar reciclando materiales mencionados anteriormente, se tomó en cuenta varios aspectos importantes que se describen en este capítulo, los cuales son fundamentales para determinar las dimensiones del simulador solar, para el caso del presente trabajo el diseño se adaptó a los materiales reciclados disponibles.

#### **3.1.2. Características de los componentes del simulador solar:**

##### **a) Tamaño de las lentes:**

El tamaño de los lentes a usarse determinó el ancho que la estructura del simulador tendría y el ancho de la columna de agua también. Cada una de las lentes que se usaron, tienen un soporte que enmarca la lente para facilitar la manipulación y ubicación en las pruebas y finalmente en el simulador. Se probó varios soportes a lo largo de las pruebas (ver Figuras 34 y 35) de los cuales los identificados en la Figura 35, son los que se adoptaron finalmente para el simulador.

#### Lentes en soportes metálicos



*Figura 34.* Los lentes en los soportes metálicos se usaron en las pruebas.

Fuente: Soledad Tamayo

#### Lentes en soportes madera



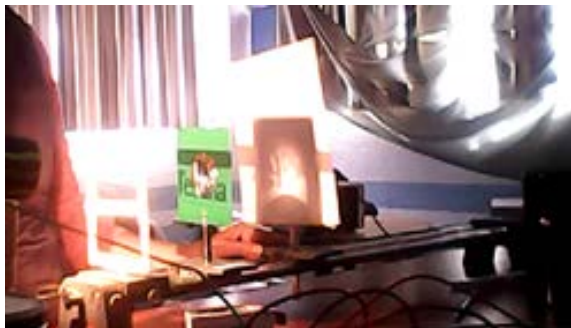
*Figura 35.* Los lentes en los soportes de madera usados en el simulador.

Fuente: Soledad Tamayo

#### b) Distancia focal de las lentes:

Cada una de las lentes tiene su propia distancia focal y esto ayudó a determinar parte de la longitud del simulador solar (ver Figura 36) ya que la fuente de luz proveniente de la lámpara halógena se las ubicaría entre la distancia focal de las lentes.

#### Determinación práctica de distancias focales.



*Figura 36.* Determinación método experimental de las distancias focales de los lentes

Fuente: Soledad Tamayo

En el numeral 3.2 se detalla como parte de la caracterización de los lentes, el procedimiento para la determinación de la distancia focal de cada uno de los lentes.

c) Columna de agua:

La longitud de la columna de agua también ayudó a determinar parte de la longitud total del simulador solar, para obtener la longitud adecuada de la columna de agua se probó con varias columnas de diferente tamaño hasta obtener la que sería la definitiva.

Las columnas más grandes (ver Figura 37) de dimensiones 30 [cm] x 25 [cm] x 20 [cm] y 20 [cm] x 25 [cm] x 20 [cm] absorben gran cantidad de la radiación emitida por la lámpara halógena sin embargo la radiación se disipaba demasiado impidiendo volver a concentrarla al final de la columna, el tamaño de la longitud de la columna de agua fue disminuyendo hasta que la definitiva tiene una longitud de 5 [cm] x 7 [cm] x 10 [cm], que permite que la radiación atravesase sin disiparse demasiado así se absorbe parte de ella y el resto puede volver a ser concentrado al final de la columna con suficiente potencia.

Columnas de agua usadas en las pruebas



*Figura 37.* Las columnas de agua que se usaron en las pruebas fueron de varios tamaños.

Fuente: Soledad Tamayo

d) Fuente de energía:

En un inicio la fuente de energía que alimenta las lámparas de xenón y halógena no tenía mayores requerimientos que 12 [V] y el amperaje suficiente para encender las lámparas, sin embargo después de varias pruebas y para dimensionar el que finalmente

sería el simulador se adquirió una que suministraría energía a las luces led (ver Figura 29).

e) Lámpara halógena y leds

La lámpara halógena como ya se ha señalado anteriormente, cumple con ciertas características como: potencia de 55 [W], voltaje de 12[V], tamaño 3 [cm] de longitud, filamento horizontal. La lámpara halógena es la que aporta con la mayor cantidad de radiación para formar el espectro solar.

Las luces led como también se ha mencionado anteriormente cumplen con la función de rectificar el espectro solar de forma puntual en ciertas zonas del espectro.

### 3.1.3. Pruebas preliminares para determinación del diseño

Una vez diseñado el simulador solar se procede a realizar pruebas con cada uno de los componentes: lámparas, lentes, columna de agua, etc.

El primer paso para determinar el diseño es lograr colimar la radiación proveniente de cada una de las lámparas, al tener la radiación concentrada en un haz se puede direccionar la radiación con menos pérdidas.

Para la colimación de la radiación de las lámparas se ensayó varias veces y a continuación lo detallamos:

a) Prueba 1.

En este primer ensayo se envolvió cada una de las lámparas en un cono de papel blanco con la finalidad de que la radiación se disipe menos como se observa en las Figuras 38 y 39.

El cono de papel se quemó por la temperatura a la que lámparas se calientan al encenderse.

Cono de papel



*Figura 38.* Cono de papel blanco

Fuente: Soledad Tamayo

Cono de papel en soporte



*Figura 39.* Cono de papel en soporte a la altura del primer lente

Fuente: Soledad Tamayo

b) Prueba 2.

En el siguiente ensayo se usó de igual manera un cono de papel pero en este caso se lo envolvió en papel aluminio con la finalidad de que no se quemará al encender las lámparas.

A pesar de que el papel aluminio le otorgó al cono mayor resistencia al calor como se puede observar en las Figuras 40 y 41, este después de un tiempo también se quemó, lo que descarto al cono como opción para concentrar la radiación de las lámparas.



Papel aluminio para cubrir el cono



*Figura 40.* Se cubrió el papel con aluminio para hacer el cono.

Fuente: Soledad Tamayo

Cono con cubierto de papel aluminio



*Figura 41.* Cono con papel aluminio encendido

Fuente: Soledad Tamayo

c) Prueba 3.

El papel aluminio refleja la luz de las lámparas ocasionando que el haz de luz que sale del cono de aluminio no sea uniforme, para resolver esto, se usó un cono de papel grueso oscuro de color negro (ver Figura 42) para evitar que la luz se refleje dentro del cono una y otra vez y el haz resultante sea más uniforme.

Al final del cono se colocó uno de los lentes (biconvexo) que se recicló de los proyectores para que al salir la luz esta sea concentrada por el lente y el haz sea uniforme.

Una vez implementado, la luz de las lámparas se concentró mejor que con las pruebas anteriores, sin embargo el haz no fue del todo paralelo.

Cono de color negro



*Figura 42.* Cono de color negro con lente biconvexo

Fuente: Soledad Tamayo

d) Prueba 4.

Para este ensayo se tomaron varias latas de bebidas que tienen forma cilíndrica, primero se probó con las latas en color plateado original del material del que están elaboradas, después se las pintó de negro como se ve en las Figura 43 y 44 para comparar cual haz de luz es más uniforme.

Lata de bebida



*Figura 43.* Lámpara en lata de bebida

Fuente: Soledad Tamayo

Lata de bebida pintada



*Figura 44.* Lámpara en lata pintada de negro  
Fuente: Soledad Tamayo

e) Prueba 5.

A continuación fue necesario probar materiales más resistentes al calor, por lo que se usó la carcasa de una vieja lámpara de patio la cual es de metal y no sufriría daños debido al calor de las lámparas. Se dispuso de dos carcassas para las dos lámparas (halógena y xenón) como se observa en la Figura 45.

Primero se usó las carcassas con su color original plateado, sin embargo se las pinto de negro para verificar si el haz resultante era más paralelo que el obtenido con las carcassas plateadas. El haz que resultó no es mejor que los obtenidos en las pruebas anteriores, la mejoría está en que este tipo de carcassas resisten muy bien el calor y no se quema permitiendo que se mantengan encendidas las lámparas por largo tiempo y se pueda trabajar con ellas sin hacer pausas para enfriarlas.

Carcasa reciclada de lámpara de patio

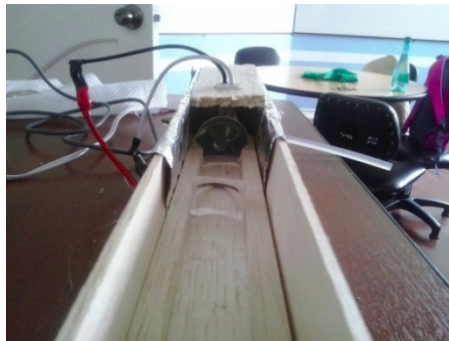


*Figura 45.* Carcasa reciclada de lámpara de patio de metal  
las cuales son más resistentes al calor  
Fuente. Soledad Tamayo

f) Prueba 6.

Para la siguiente prueba se colocaron las lámparas dentro de una estructura sellada con el fin de encerrar la radiación emitida, evitar que se disipe y conducirla a través de los lentes como se observa en las Figuras 46 y 47. La parte en la que se sujetan cada una de las lámparas se cubrió con papel aluminio para evitar se quemen las paredes con el calor de las lámparas, a continuación y secuencialmente se colocaron los lentes. El haz resultante es poco intenso y no se logra obtener la potencia deseada debido a que los lentes usados aquí son los pequeños obtenidos del proyector de slides y cámaras fotográficas. Al ser los lentes y la estructura que los contiene pequeños el haz resultante es bastante paralelo se podría concluir que con esta prueba se ha llegado lo más cerca del concepto de “colimar” la radiación de las lámparas, sin embargo el problema de la poca intensidad hace que se descarte este diseño.

Estructura cerrada visa frontal



*Figura 46.* Estructura cerrada para lámpara y lentes.

Fuente: Soledad Tamayo

Estructura cerrada visa lateral



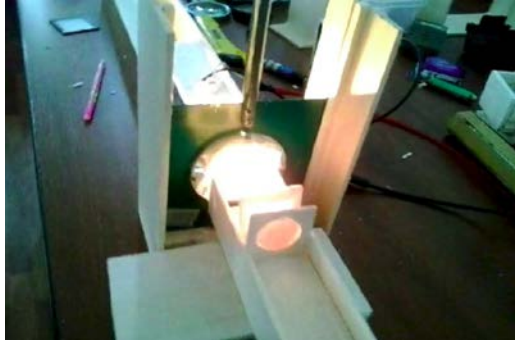
*Figura 47.* Estructura cerrada para lámpara y lentes.

Fuente: Soledad Tamayo

g) Prueba 7.

En este ensayo se repitió lo anterior usando una combinación de los lentes grandes y los pequeños con el fin de corregir el problema de la baja intensidad del haz resultante como se observa en la Figura 48. Al final el haz resultante es bastante paralelo también se puede decir que el haz esta colimado sin embargo la intensidad no es suficiente para lo requerido. Por lo tanto se concluye que los lentes pequeños son la causa de la baja intensidad del haz.

Estructura cerrada con lentes grandes y pequeños



*Figura 48.* Lente grande biconvexo y lentes pequeños  
Fuente. Soledad Tamayo

#### h) Prueba 8.

Se repitió el ensayo pero esta vez solo con los lentes grandes como se ve en las Figuras 49 y 50, ya que se descartaron los lentes pequeños como resultado del ensayo anterior. Se construyó una estructura similar a la anterior más grande, del tamaño adecuado para poder contener los lentes grandes de los proyectores; cerrado para evitar que la luz se disipe y lograr se conduzca a través de los lentes colocados a continuación de la lámpara a la distancia focal de cada lente. También se le colocó un espejo convexo antes de la lámpara para observar si este podría ayudar a concentrar la radiación. El resultado fue un haz medianamente concentrado, el espejo convexo no ayudó a colimar la luz, ocasiono un fenómeno curioso en el que se reflejaba 2 veces la imagen del filamento de la lámpara, por lo que se decidió retirarlo de la estructura.

Estructura con lentes grandes vista frontal



*Figura 49.* Estructura con lentes grandes  
Fuente. Soledad Tamayo

Estructura con lentes grandes vista lateral



*Figura 50.* Estructura con lentes grandes  
Fuente. Soledad Tamayo

#### 3.1.4. Disposición final de los componentes en el simulador solar

A continuación se describe el orden en el que se disponen cada una de las partes que compone el simulador solar usando el reciclaje de lentes de proyectores en desuso, los cuales de otra manera son considerados residuos que colaboran con la contaminación ambiental.

- La lámpara, los lentes, la columna de agua y el arreglo led con sus respectivos soportes se mantendrán en posiciones fijas y determinadas mediante nueces a un riel.
- Fuente de luz: la lámpara halógena se ubican al inicio, está debe fijarse para evitar se muevan y modifiquen la distancia a la que se ubican los lentes. Al estar la lámpara fija se asegura que esta no caiga de su ubicación y de daño.

- Lente 1 (biconvexo) con distancia focal de 5.5 [cm] es el primero en ubicarse frente a la lámpara halógena cuidando que el centro de la lámpara y el centro del lente estén a la misma altura sobre el riel.
- La columna de agua se coloca frente a la lente 1 de manera que la luz proveniente de la lámpara que atraviesa la lente 1 también atraviese la columna que contiene agua.
- Lente 2 (biconvexo) se ubica a continuación de la columna de agua con el fin de concentrar nuevamente la luz se pasa a través de ella.
- La fuente de poder la cual suministra energía al simulador no tienen una ubicación específica sin embargo se coloca cerca de la lámpara para evitar que los cables tengan longitudes muy largas y estorben en el correcto funcionamiento del simulador.

### 3.2. Caracterización de los lentes:

Para conocer las características de los lentes se procede a tomar medidas de los perímetros, radios y diámetros de cada uno de los lentes. En la Tabla 9 se puede apreciar las medidas y la forma de los lentes

Tabla 9.  
*Características de lentes*

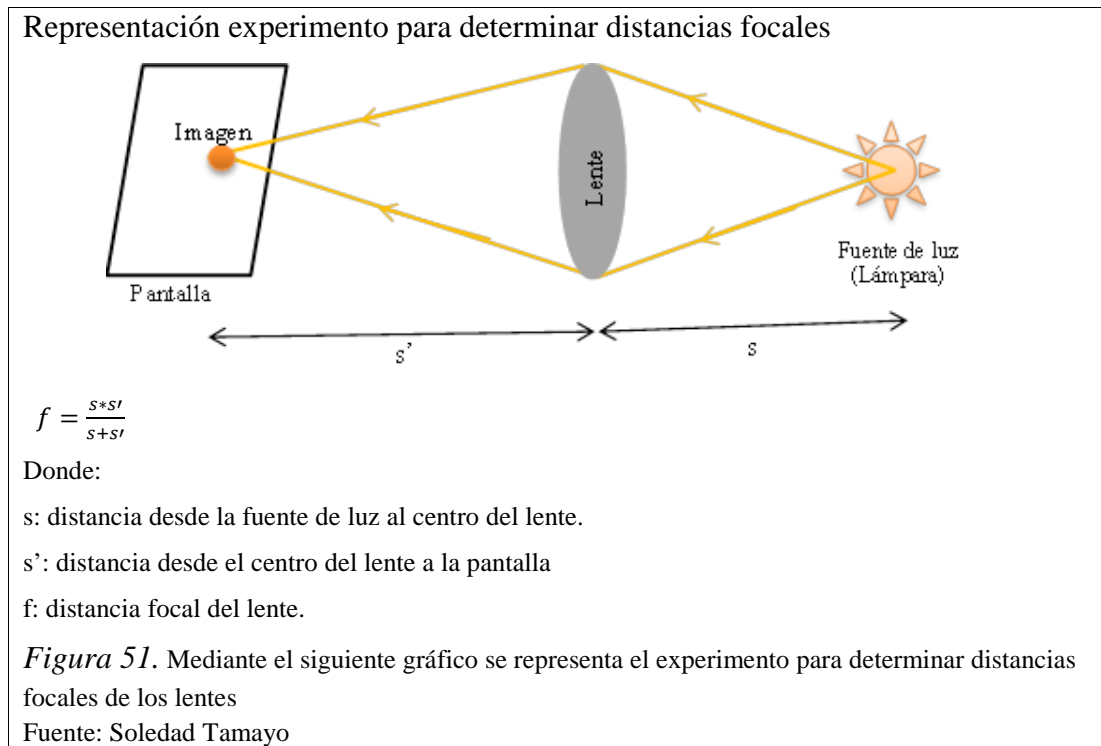
Lente	Perímetro	Radio	Diámetro	Observaciones
1	21.6	3.43774677	6.87549354	Biconvexo
2	15.9	2.5305636	5.06112719	Biconvexo
3	27.6	4.39267643	8.78535286	Menisco convexo
4	27.6	4.39267643	8.78535286	Menisco convexo

Nota. Se obtuvieron medidas de las características físicas de los lentes.  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

De forma experimental (ver Figura 36) se determinó las distancias focales de los lentes para lo cual:

- Se coloca cada lente en un soporte.
- Los soportes se sujetan al riel que permiten mover los lentes a voluntad

- Se fija la lámpara en un lugar determinado punto cero al inicio del riel, a la misma altura del centro de los lentes.
- Se coloca una pantalla al final del riel que permitirá proyectar el haz de luz que se origina después de que la luz de la lámpara atraviesa el lente.
- Mientras se mueve el lente variando la distancia que lo aleja y acerca de la lámpara se puede visualizar en la pantalla el punto donde la luz se concentra.
- Una vez que se observa el punto de concentración de la luz en la pantalla, se mide la distancia entre el lente y la lámpara, y la distancia entre el lente y la pantalla, para mediante un cálculo obtener la distancia focal que posee el lente (ver Figura 51).



Una vez obtenidas las medidas de la distancia entre la fuente de luz y el centro del lente (s) y la distancia entre el centro del lente y la pantalla (s'), se usa una relación matemática denominada “ecuación de la lente delgada” ( $f = \frac{s \cdot s'}{s + s'}$ ) para determinar las distancias focales de cada lente.

En la Tabla 10 se observan las medidas que se tomó para cada lente, los lentes 3 y 4 obtenidos de retroproyectores son de características similares en tamaño y forma por



lo que bastó con caracterizar uno para saber la distancia focal del otro. Después de determinar las distancias focales de los 4 lentes se observa que los lentes 3 y 4 tienen una distancia focal de 29.46 [cm], que en comparación con los demás lentes es bastante superior en longitud. Para modificar la distancia focal de los lentes 3 y 4 se los unió en un solo soporte y se los trató como si fueran un solo lente (lente 5), después de unir los lentes 3 y 4 se procedió a caracterizarlo de nuevo y a pesar de que el tamaño no cambió la distancia focal disminuyó de 29.46 [cm] a 15.24 [cm].

La distancia focal de lente 5 es casi la mitad de la distancia focal de los lentes 3 y 4 lo que ayuda a evitar que la longitud del simulador sea demasiado grande y que la potencia de la radiación emitida por las lámparas sufra menos pérdidas en el trayecto durante la pruebas.

De cada lente se tomó cuatro veces las medidas de las distancias de la lámpara al lente (s) y del lente a la pantalla (s'), en la tabla 10 se observa que las cuatro medidas guardan cierta relación entre ellas, lo que hace más confiable el valor de la distancia focal que se obtuvo de los lentes.

Tabla 10

*Determinación de las distancias focales de los lentes*

Lentes	S	s'	f	Promedio	Observaciones
1	6,3	50,9	5,6061189	5,5998937	
	5,8	44,3	5,1285429		
	6,9	30,8	5,6371353		
	7	43,4	6,0277778		
2	12,2	17,9	7,2551495	7,2056926	
	10,1	32,2	7,6884161		
	8,9	19,9	6,1496528		
	21,4	12,1	7,7295522		
3 o 4	62,8	55,7	29,51865	29,46222	los lentes 3 y 4 son iguales en tamaño y forma
	50,4	71,3	29,527691		
	208,5	34,2	29,380717		
	45,7	82,6	29,421824		
3 y 4	58,6	20,9	15,405535	15,249701	Se unieron los lentes 3 y 4 en un mismo soporte, de esta manera se modifica la distancia focal
	21,1	53,9	15,163867		
	22,5	47,6	15,278174		

	33,3	27,8	15,151227		
--	------	------	-----------	--	--

Nota. Con los datos de la tabla 9 se realizaron los cálculos para determinar las distancias focales.  
Elaborado por: Soledad Tamayo.

### 3.3. Procedimiento de construcción del simulador solar.

Para iniciar la construcción del simulador solar se requiere tener los materiales y el diseño para el presente trabajo se realizó la correcta gestión para la adquisición de los proyectores de slides y retroproyectores de los cuales se obtuvieron los respectivos juegos ópticos como muestran las Figuras 52 y 53. Para conseguir los proyectores, los cuáles son colaboración de la Escuela Politécnica Nacional, se elaboró una solicitud dirigida al departamento de control de bienes de la EPN, en donde después de constatar que estos existían confinados en una bodega, se procedió a la entrega de los mismos y se obtuvieron los juegos ópticos de los proyectores necesarios para la construcción de del simulador solar.

Retroproyector reciclado



*Figura 52.* Retroproyector del cual se obtuvo lentes  
Fuente. Soledad Tamayo

### Proyector de slides reciclado



*Figura 53.* Proyector de slides del cual se obtuvo un juego óptico de 4 lentes  
Fuente: Soledad Tamayo

Del proyector de slides se obtuvo una lente biconvexa de 6.87 [cm] de diámetro y 3 lentes pequeñas: una bicóncava, otra plano convexa y una menisco convexa de 2 [cm] cada una. De los retroproyectores se obtuvo dos lentes menisco convexo de 8.7 [cm] de diámetro cada uno, estos se pueden observar en la Figura 54.

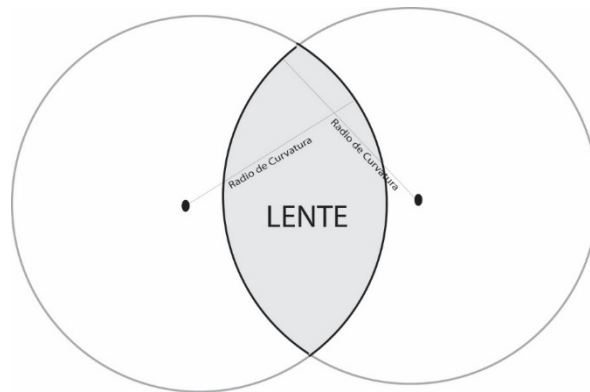
### Lentes pequeños del proyector de slides



*Figura 54.* Se obtuvieron 3 pequeños lentes del proyector de slides  
Fuente: Soledad Tamayo

De los proyectores se obtuvieron varios lentes de los cuales 2 de entre los más grandes son los que finalmente formaran parte del simulador solar, esto debido a que, lentes con superficies de radios de curvatura pequeños tienen distancias focales pequeñas (ver Figura 55).

### Representación radio de curvatura



*Figura 55.* Representación radio de curvatura  
Fuente: Soledad Tamayo

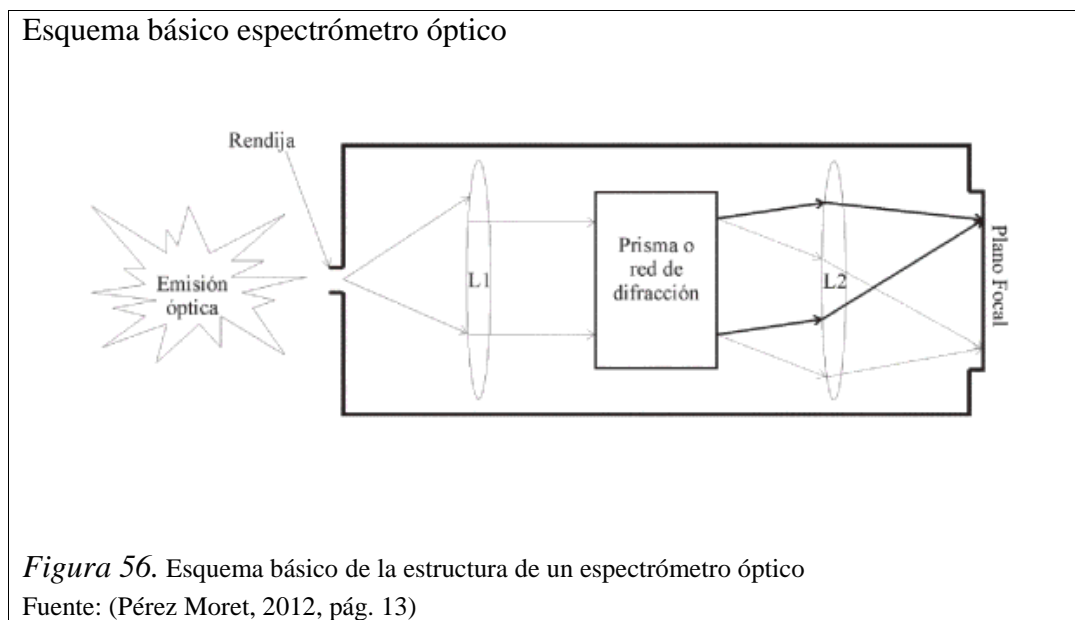
## CAPÍTULO 4

### CALIBRACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SIMULADOR SOLAR

Antes de culminar la calibración e implementación del simulador solar construido con materiales reciclados es necesario hablar del espectrómetro usado en el presente trabajo para obtener los espectros del simulador tanto en la parte de pruebas como en la parte de implementación.

#### 4.1. Funcionamiento del espectrómetro

El espectrómetro es un dispositivo mediante el cual, al hacer incidir radiación en forma de luz en una fibra óptica, esta es obligada a pasar por una estrecha ranura y un lente colimador, lo que resulta en un haz concentrado y paralelo, consecutivamente, En el interior del espectrómetro el haz colimado choca en un prisma que refracta la luz descomponiéndola en diferentes longitudes de onda, donde un detector electrónico las selecciona y mediante el programa adecuado se grafica el espectro del cuerpo emisor. Dependiendo del espectrómetro el prisma puede ser remplazado por una rejilla de difracción que cumple la misma función. En la Figura 56 se puede observar un básico esquema de un espectrómetro óptico.



A continuación en la Figura 57 se observa el espectrómetro usado para adquirir el espectro: solar natural de Quito y los del simulador en la etapa de pruebas y en la etapa de implementación.

#### Espectrómetro Ocean Optics USB 4000



*Figura 57.* A la izquierda espectrómetro Ocean Optics USB 4000 y a la derecha lámpara halógena usada en este proyecto para calibrar el espectrómetro  
Fuente. Soledad Tamayo|

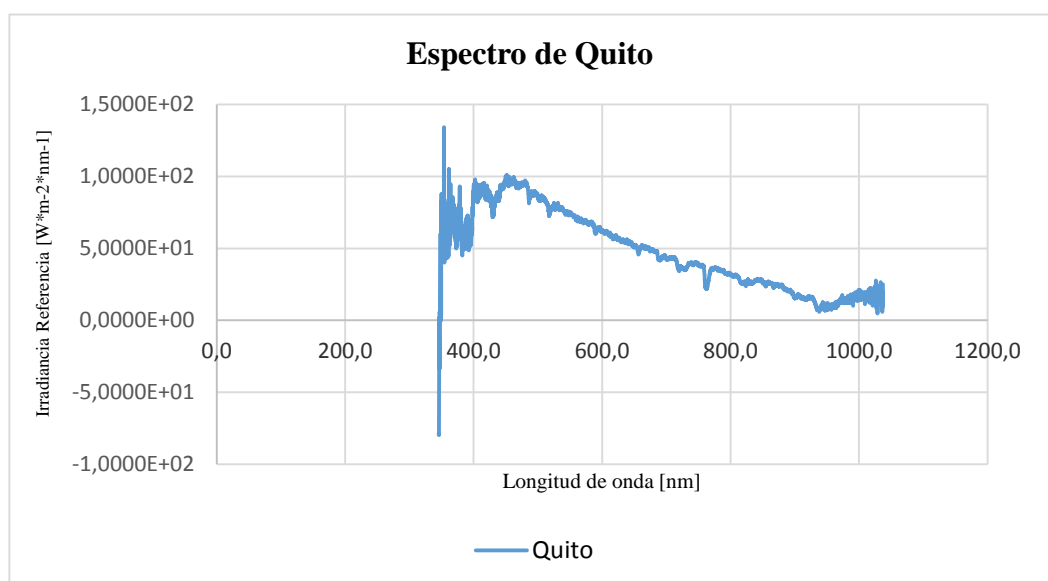
### 4.2. Calibración del simulador solar

La calibración se define como: “la comparación de un estándar de medición, o de un equipo, con un estándar o equipo de mayor exactitud, para detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste” (Aviles, 2014, pág. 1). A partir de esta definición se puede explicar la metodología que se desarrolló para calibrar el simulador solar construido a partir del reciclaje del juego óptico de proyectores.

#### 4.2.1. Metodología de la calibración del simulador solar

- a) Obtener el espectro solar natural local (Quito) en un día despejado entre las 11:00 am a 12:00 pm, en este intervalo de tiempo los valores de irradiación solar alcanzan una potencia de  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ . El espectro es tomado con la ayuda del espectrofotómetro y su respectivo programa “spectrasuite” en la longitud de onda que incluya el rango de luz visible (350 [nm] a 780 [nm]). Los datos son exportados a una hoja de cálculo que permita procesarlos y de esta manera graficar el espectro solar natural de la ciudad de Quito como se ilustra en la Figura 58. Para determinar que la potencia es de  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  se usa un potenciómetro el cual mide la cantidad de potencia que se tiene en la radiación solar de la que se tomó el espectro natural de Quito.

## Espectro de Quito

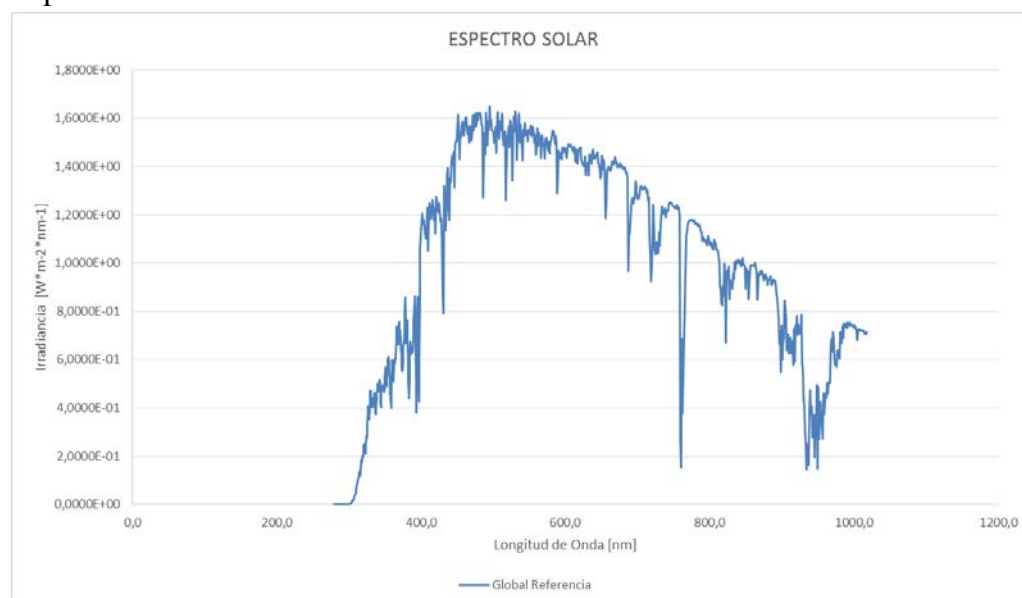


**Figura 58.** Espectro solar natural de Quito

Elaborado por Soledad Tamayo

- b) Obtener el espectro solar de referencia ASTM G173 (norma de especificación para simuladores solares para medición fotovoltaica). Los datos son procesados en una hoja de cálculo y se grafica el espectro solar de referencia como se observa en la Figura 59.

## Espectro de referencia ASTM



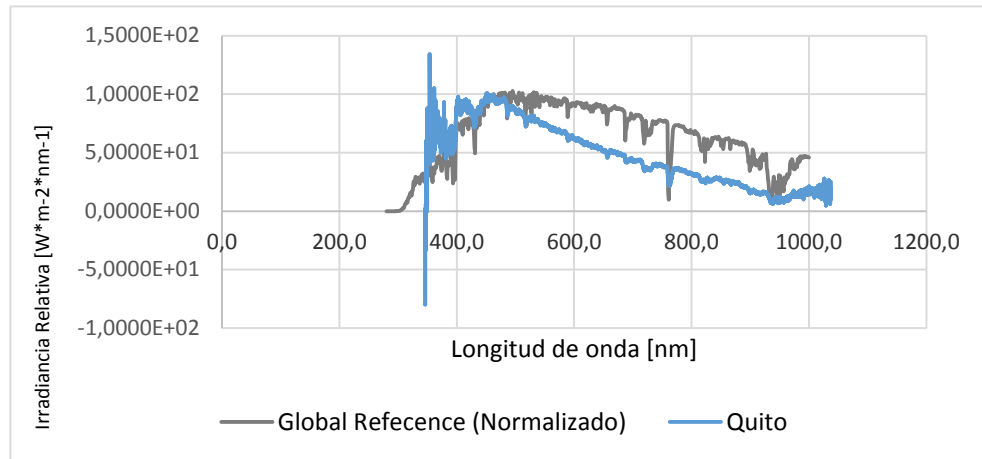
**Figura 59.** Espectro de referencia ASTM

Elaborado por Soledad Tamayo

- c) En un gráfico se coloca los espectros de Quito y de referencia con el fin de compararlos y observar las similitudes entre ellos y concluir que la medición del

espectro natural obtenida es válido y se puede usar para calibrar el espectro simulado como lo ilustra la Figura 60, además se deduce que el funcionamiento del espectrómetro es adecuada.

Espectros solares en Quito y de referencia

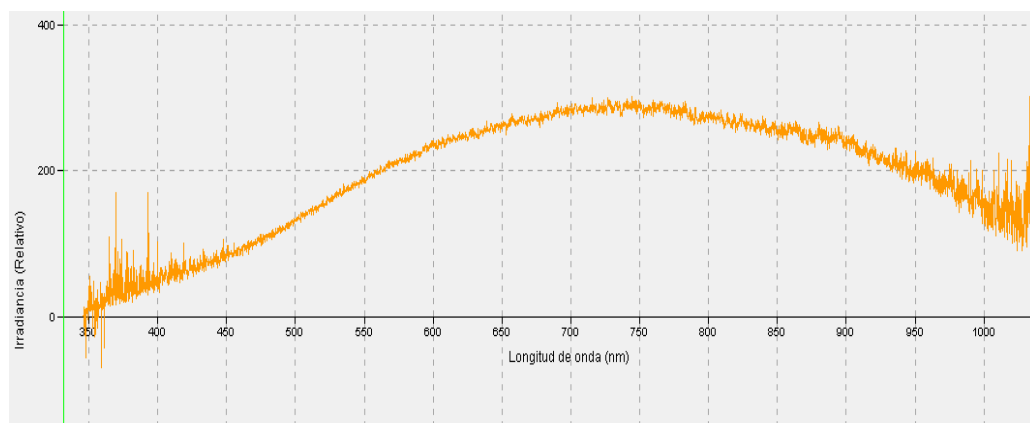


*Figura 60.* El espectro de referencia global normalizado, se colocó el punto más alto del espectro de referencia en 1000  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}]$  para hacer coincidir con el punto más alto del espectro natural de Quito

Elaborado por Soledad Tamayo

- d) Se toma datos y se grafica el espectro de lámpara halógena encendida y en posición fija, con el espectrómetro y se guarda los datos el espectro grafiado se puede ver en la Figura 61 a continuación.

Espectro de lámpara halógena



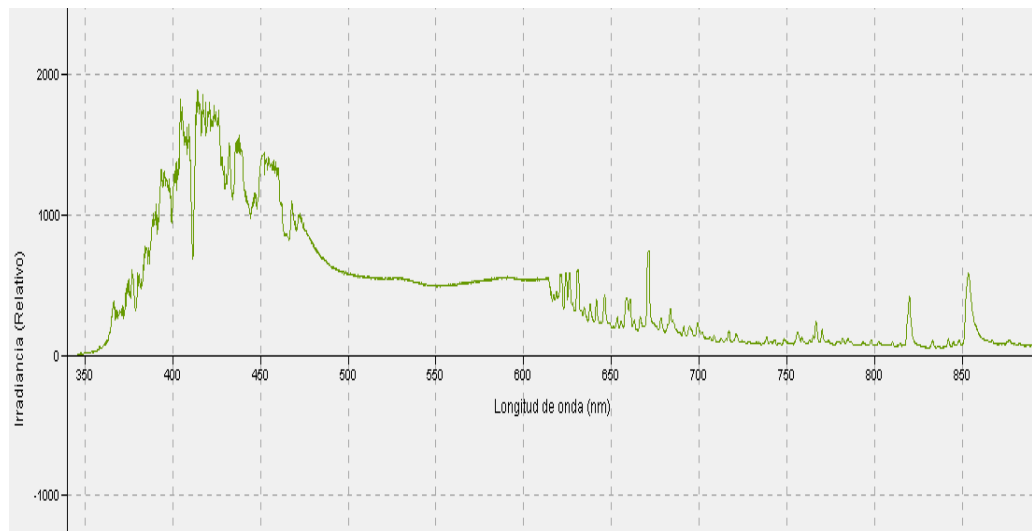
*Figura 61.* Espectro de lámpara halógena

Elaborado por Soledad Tamayo

- e) Se toma datos y se grafica del espectro de lámpara de xenón encendida y en posición fija como se observa en la Figura 62, con ayuda del espectrómetro y se guarda los datos obtenidos.



### Espectro de lámpara de xenón

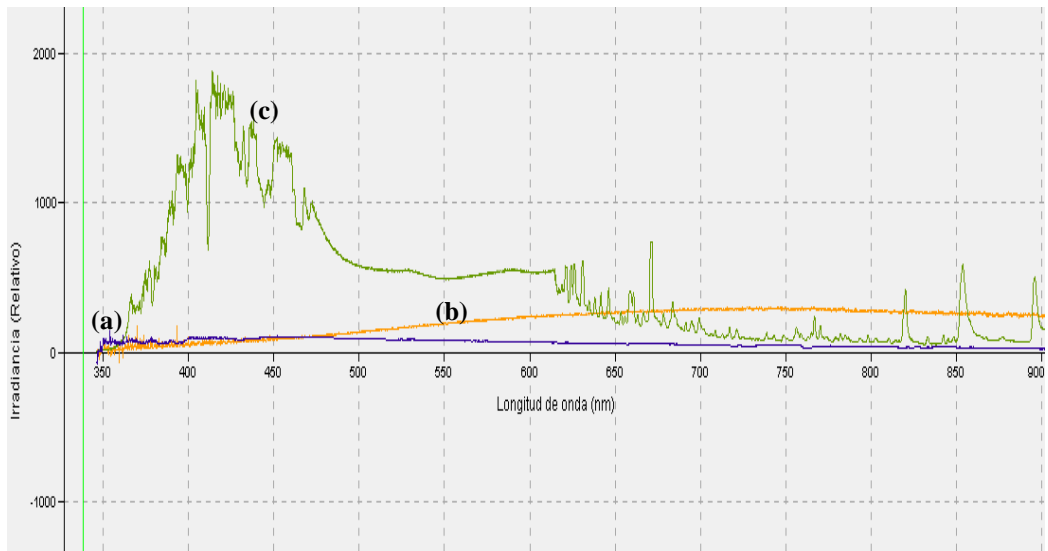


*Figura 62.* Captura del espectro de lámpara de xenón

Elaborado por Soledad Tamayo

- f) En un mismo gráfico se colocan los espectros de Quito, de la lámpara halógena y de la lámpara de xenón con el fin de compararlos como se observa en la Figura 63. Se puede notar que la lámpara de xenón es más intensa en el rango del ultravioleta que halógena.

### Espectros de Quito, lámpara halógena y de xenón

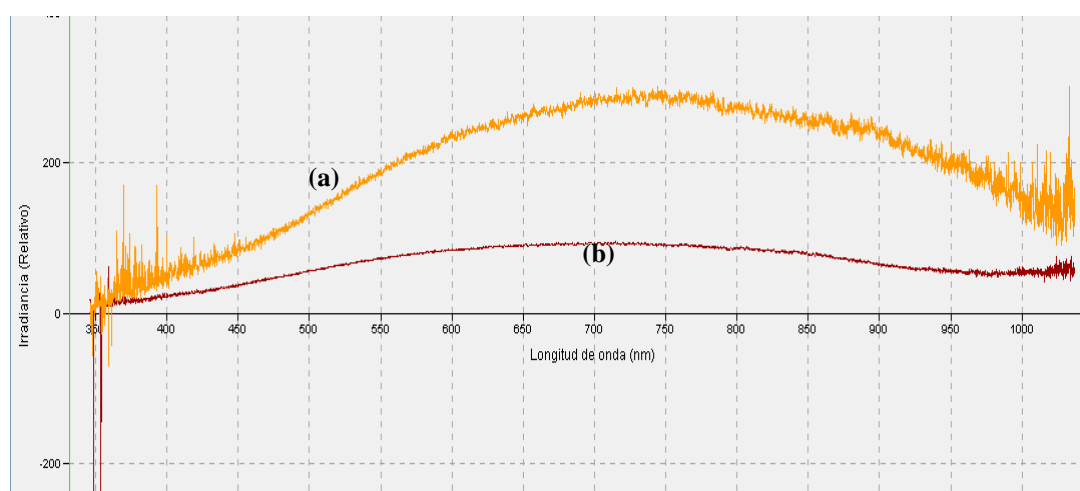


*Figura 63.* (a) Espectro de Quito, (b) Espectro lámpara halógena, (c) Espectro lámpara de xenón.

Elaborado por Soledad Tamayo

- g) Se colocan los espectros de la lámpara halógena con columna de agua y sin columna de agua, se puede visualizar la diferencia entre ellos en la Figura 64. El agua absorbe gran cantidad de radiación del espectro en especial de la parte infrarroja.

### Espectros de la lámpara halógena con y sin columna de agua

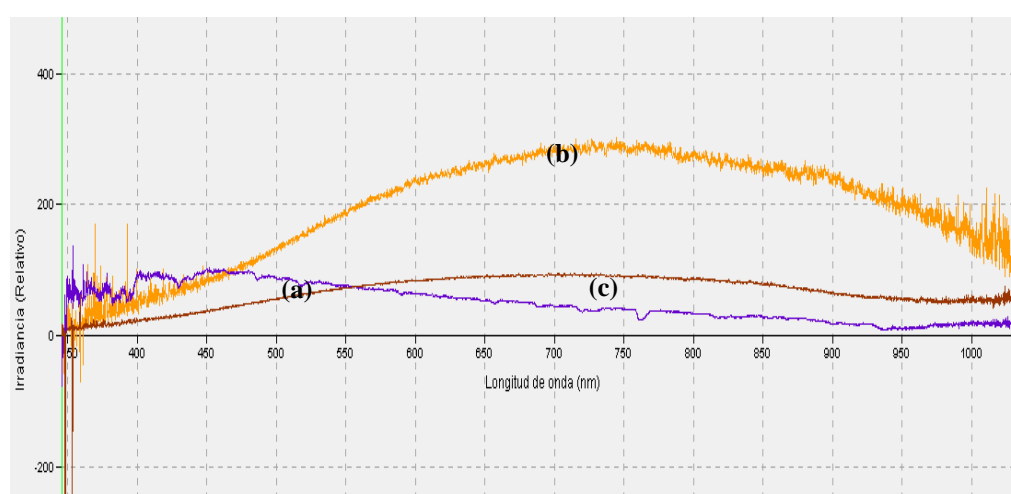


**Figura 64.** (a) Espectro de la lámpara halógena sin columna de agua, (b) Espectro lámpara halógena con columna de agua.

Elaborado por Soledad Tamayo

- h) En un mismo gráfico se colocan los espectros del sol en Quito (ver Figura 65), de la lámpara halógena sin columna de agua y de la lámpara halógena con columna de agua.

### Espectros de Quito, lámpara halógena con y sin columna de agua

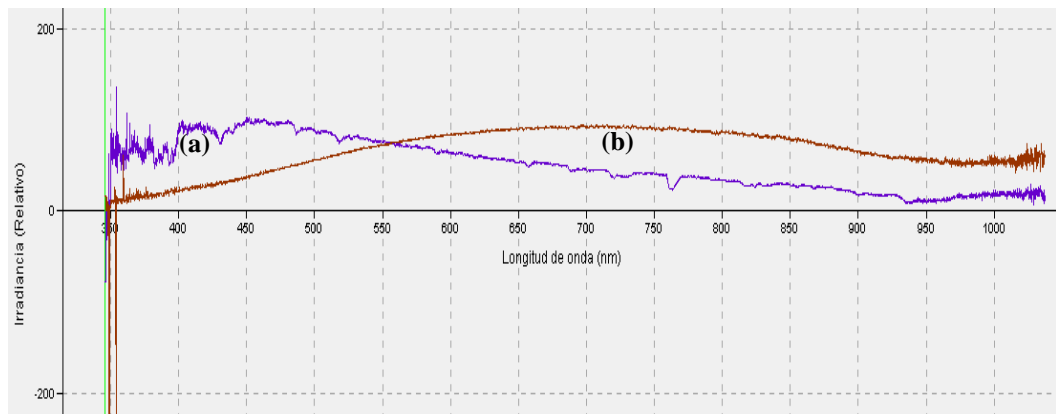


**Figura 65.** (a) Espectro del sol en Quito, (b) Espectro de la lámpara halógena sin columna de agua, (c) Espectro lámpara halógena con columna de agua

Elaborado por Soledad Tamayo

- i) Se coloca los espectros del sol de Quito y la lámpara halógena con columna de agua en un gráfico (ver Figura 66), para observar como al absorber el agua parte de la intensidad de la radiación el espectro de la lámpara se ajusta mejor al espectro del sol.

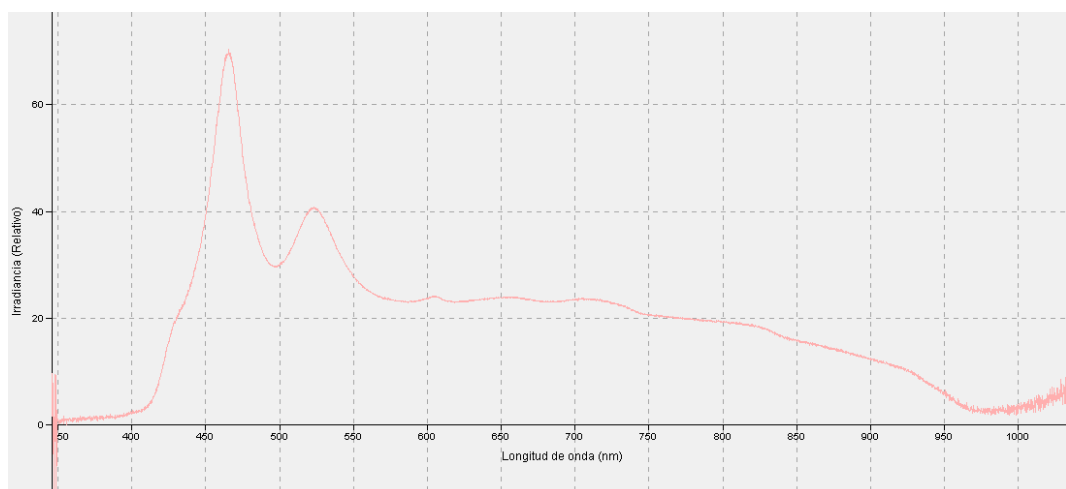
### Espectros de Quito y lámpara halógena con columna de agua



**Figura 66.** (a) Espectro del sol en Quito, (b) Espectro lámpara halógena con columna de agua.  
Elaborado por Soledad Tamayo

- j) El arreglo de luces led se usa para mejorar la parte del espectro comprendida entre 350 [nm] a 550 [nm] que corresponde al violeta, azul y verde. Son 26 led usados en el simulador distribuidos en: 4 de color violeta, 9 de color azul, 9 de color verde y 4 de color naranja. Esto permite que el espectro se ajuste de mejor manera al espectro natural de Quito como lo ilustra la Figura 67 a continuación.

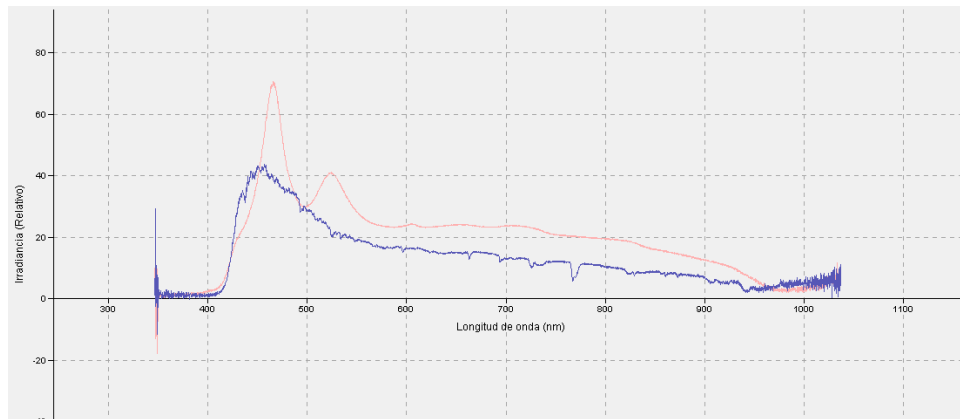
### Espectro del Simulador Solar



**Figura 67.** Espectro simulado con el arreglo de luces led  
Elaborado por Soledad Tamayo

- k) Una vez implementado el arreglo de luces led se puede comparar el espectro solar natural de Quito con el espectro del simulador solar (Ver Figura 68) e inferir en la similitud que tienen colocándolos en un mismo gráfico.

### Espectros de Quito y del simulador solar

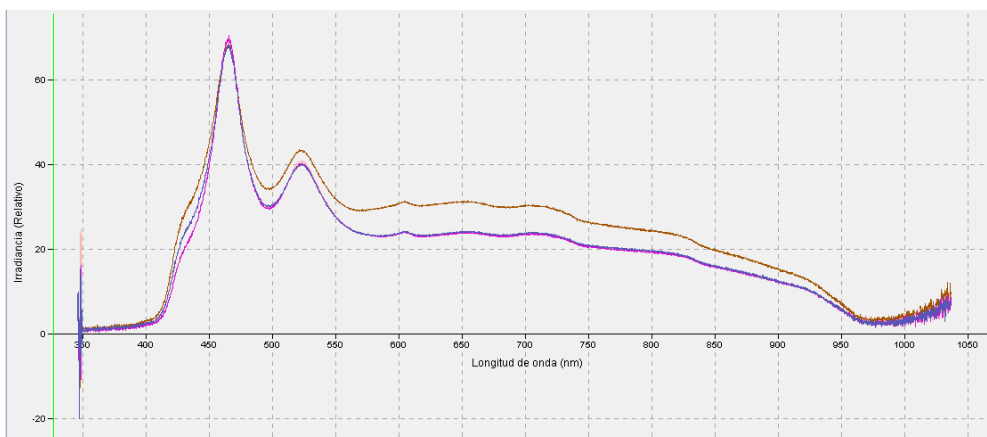


**Figura 68.** (a) Espectro del sol en Quito, (b) Espectro del simulador solar  
Elaborado por: Soledad Tamayo

### 4.2.2. Temporalidad del simulador solar

Un simulador solar además de reproducir el espectro del sol, debe poder mantener el espectro en un intervalo de tiempo que permita trabajar con él y con celdas fotovoltaicas de película fina. Para determinar la temporalidad se registró el espectro del simulador solar durante 40 minutos en intervalos de 10 minutos y lo ilustra la Figura 69.

### Espectro medidos cada 10 minutos



### Espectros medidos cada 10 minutos

0 minutos = espectro rojo

10 minutos = espectro azul

20 minutos = espectro morado

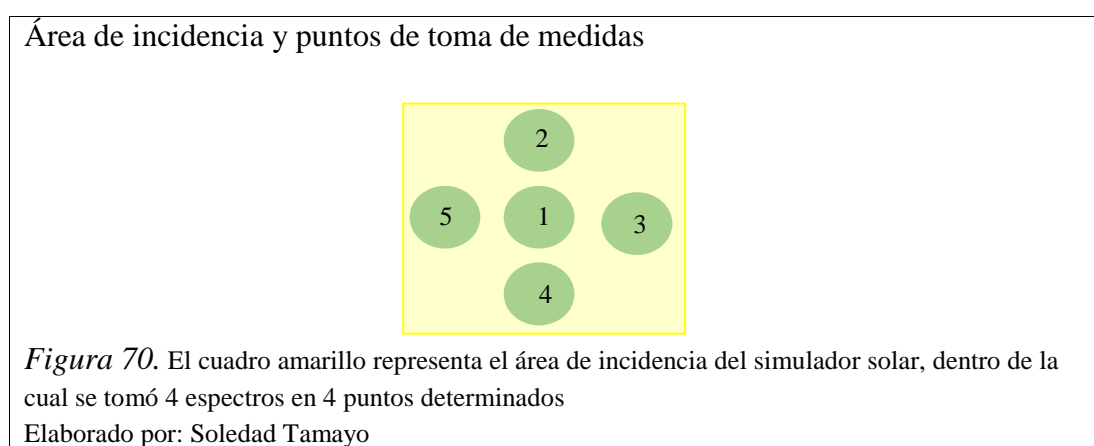
30 minutos = espectro marrón

**Figura 69.** Se puede apreciar que la curva que describe el espectro solar simulado no varía significativamente en forma con el tiempo, se puede notar que el valor de irradiancia aumentó levemente debido a que con el tiempo la lámpara halógena principalmente, se calienta produce este ligero cambio

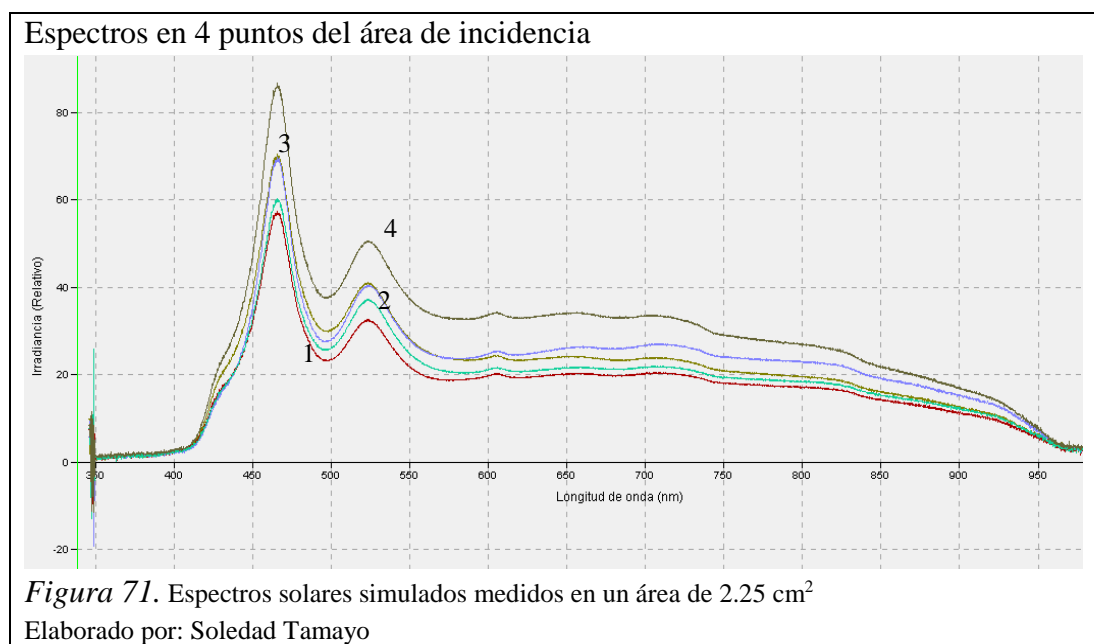
Fuente: Soledad Tamayo

#### 4.2.3. Espacialidad del simulador solar

Se delimitó un área de  $2.25 \text{ [cm}^2\text{]}$  como área efectiva de incidencia del simulador solar, dentro de la cual se obtiene un espectro solar simulado constante. Para determinar la espacialidad se toma 4 medidas del espectro en 4 puntos dentro del área de incidencia como lo muestra la Figura 70.



Una vez escogidos los puntos de medida dentro del área efectiva de incidencia y tomados los espectros en dichos puntos, que colocaron en un mismo gráfico como se observa en la Figura 71 para visualizar si hay cambios significativos en el espectro, es evidente que el espectro prácticamente el mismo en los 4 puntos.

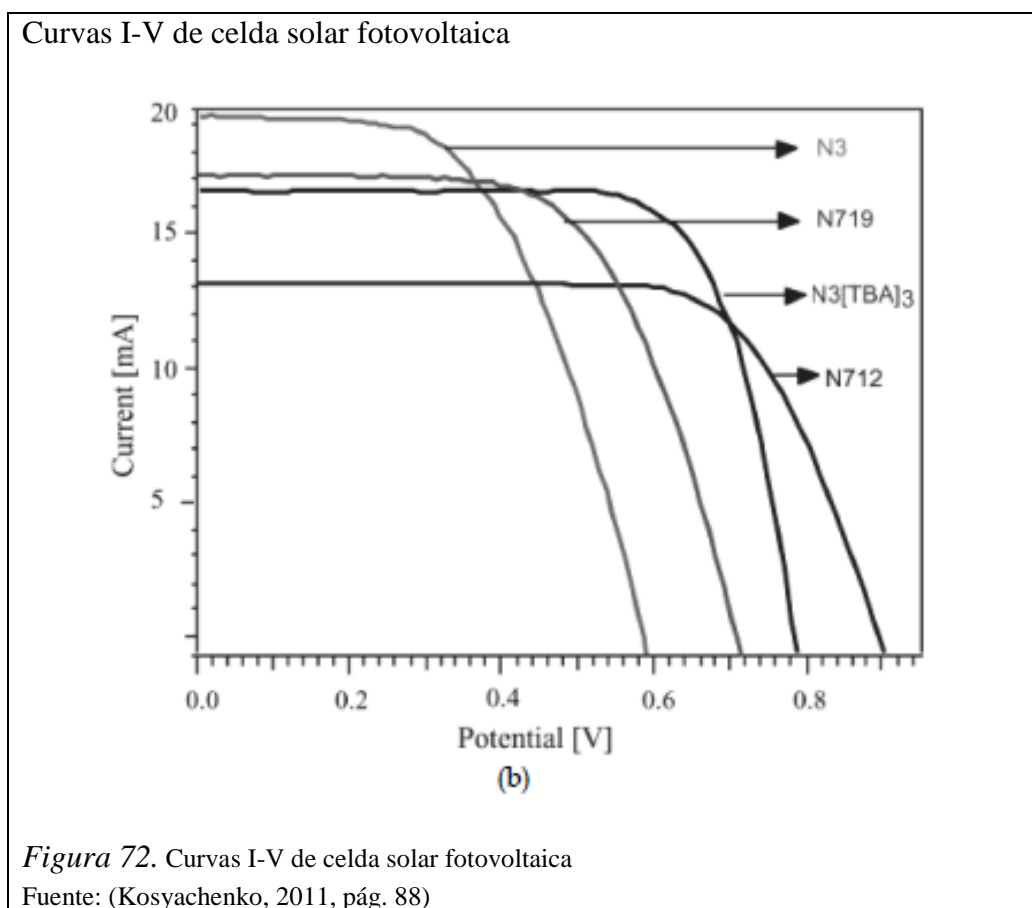


Se puede observar que la variación entre los espectros es poca, lo que permite concluir que el espectro solar simulado es constante en el espacio dentro del área efectiva de

incidencia.

#### 4.2.4. Implementación del simulador solar

La implementación se lleva a cabo después de calibrado el simulador, y consiste en ponerlo en marcha y una vez comprobado su funcionamiento se puede decir que el simulador ha quedado implementado.



A efectos de comparar los resultados obtenidos del simulador respecto a las mediciones realizadas con instrumental de laboratorio se utilizó el equipo Keithley 2400, (Keithley Tektronix Company, 2014, pág. 1). Para la obtención de datos y posterior grafica de curvas I-V.

Para elaborar la curva corriente – voltaje comúnmente se usaría un voltímetro y un amperímetro para tomar datos de voltaje y amperaje de una celda fotovoltaica irradiada y con la ayuda de una hoja electrónica se graficaría la curva I-V correspondiente.

Para graficar la curva I – V de una celda fotovoltaica usando el simulador solar, se usó la fuente Keithley que funciona como un caracterizador que además de proveer

energía a la celda fotovoltaica recoge datos de corriente y voltaje de la misma, estos datos son procesados por un software propio de la fuente que conectado a un ordenador permite visualizar las curvas de corriente – voltaje, además ya que la potencia es igual al voltaje por intensidad ( $P = V \times I$ ), se puede graficar también curvas potencia – voltaje ( P-V).

La radiación emitida por el simulador se hace incidir en una celda fotovoltaica y se obtiene la curva de corriente – voltaje respectiva, esta curva se la compara con una curva corriente voltaje conocida (ver Figura 72) y la similitud de las curvas determinará que el espectro simulado es correcto y puede ser usado en la investigación del comportamiento de celdas fotovoltaicas.

Gráfico Curva I-V de celda fotovoltaica

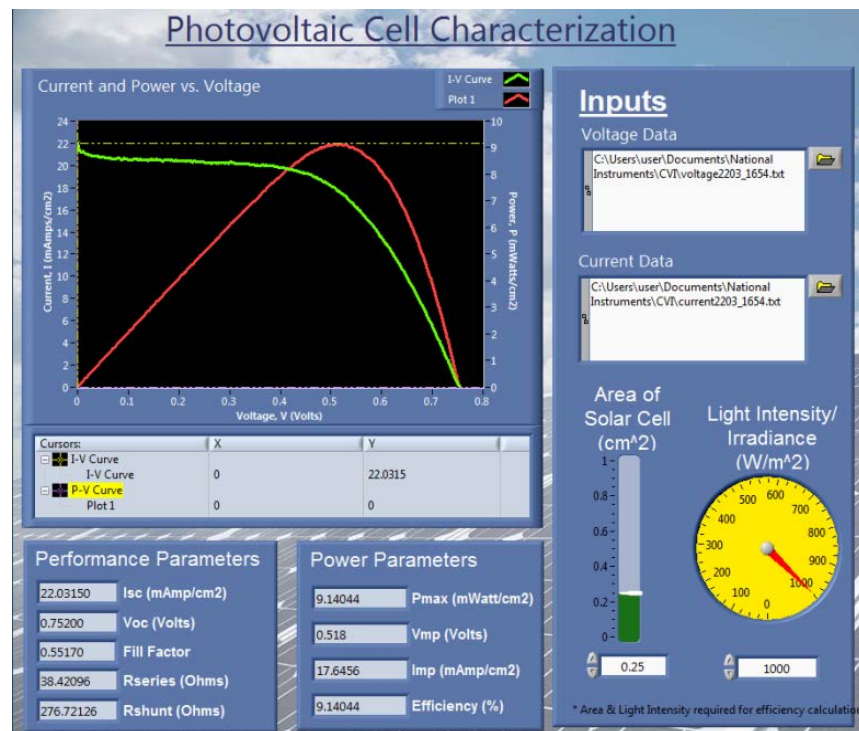


Figura 73. Curva corriente-voltaje de celda fotovoltaica con el simulador solar

Elaborado por: Soledad Tamayo

Al comparar la Figura 73 con la Figura 72 la cual es una curva I-V conocida de una celda fotovoltaica, se puede observar que la curva obtenida mediante la fuente Keithley tiene la misma forma lo que denota que la curva es correcta.

## CONCLUSIONES

- La construcción de un simulador solar, con un área efectiva de uso de  $2.25 \text{ [cm}^2\text{]}$  y una intensidad de irradiancia de  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  utilizando el juego óptico de un proyector de slides reciclado es posible y totalmente funcional para caracterizar eléctricamente celdas
- La naturaleza modular del simulador solar, permite una mejora continua en sus características técnicas, las cuales pueden ser consideradas para futuros proyectos de investigación.
- El uso del material reciclado implica un mayor esfuerzo a causa del rediseño constante a las características técnicas originales del simulador solar, llegando a consumir un 70% del tiempo de ejecución del proyecto.
- El disponer de un simulador solar construido en su mayoría a partir de material reciclado, permitirá que este proyecto pueda presentarse como una práctica reproducible en los laboratorios a nivel de estudios de pregrado en las carreras que a su criterio lo ameriten.
- El arreglo de luces led a la salida del haz de radiación, permite ajustar de mejor manera el espectro simulado a la curva del espectro solar natural.



## **RECOMENDACIONES**

- Las curvas del espectro solar natural y el espectro simulado, permitieron identificar la falta de un filtro de radiación ultravioleta adecuado para las lámparas de Xenón que pueden ser comercializadas en el territorio nacional, considerando que, si bien su curva de comportamiento era similar en forma al espectro natural, la intensidad simulada aumenta de manera desproporcionada. Se recomienda el uso de un filtro azul para radiación ultravioleta que permita filtrar suficiente radiación y de esa manera ajustar la curva del espectro.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Sudamérica Andes. (29 de Septiembre de 2012). *Andes*. Obtenido de web site:  
[www.andes.info.ec/es/actualidad/7069.html](http://www.andes.info.ec/es/actualidad/7069.html)
- American Chemical Society. (2007). *QUÍMICA: UN PROYECTO DE LA ACS*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- Aviles, J. L. (18 de Abril de 2014). *Calibración: Scribd*. Obtenido de Scribd:  
<https://es.scribd.com/doc/219037702/calibracion>
- Borrego Aguayo, J. (1994). *Ciencias de la Naturaleza* (Primera ed.). Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Callister, W. (2007). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. II). Barcelona, España: Reverté S.A.
- Castells, X., & Bordas, S. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente Territorialidad y Sostenibilidad*. España: Ediciones Díaz de Santos S.A.
- Cetto, A. M. (1996). *La luz en la naturaleza y en el laboratorio* (Primera ed.). México: Fondo de Cultura Económica.
- CONELEC. (2008). PLAN DE EXPANSIÓN. En CONELEC, *Plan Maestro de Electrificación del Ecuador 2009 - 2020*. Quito, Ecuador.
- Ecología: Ciencia Popular*. (19 de Marzo de 2012). Obtenido de Ciencia Popular:  
<http://www.cienciapopular.com/ecologia/degradacion-de-la-basura>
- El Comercio. (2 de Enero de 2014). 13 centrales eléctricas se prenderán en las provincias. *El Comercio*, pág. 28.
- Explored. (29 de 09 de 2010). *Archivo de Noticias*. Obtenido de web site:  
<http://www.explored.com.ec/noticias-ecuador/energia-geotermica-llegara-en-seis-anos-432593.html>
- Fernández Barrera, M. (s.f.). *Energía solar: Sistemas térmicos para ACS*. Madrid: Liber Factory.
- Gago, A., & Fraile, J. (2012). *Iluminación con tecnología LED*. España: Paraninfo.
- Gillespie, R. J., & Beltrán, A. (1990). *Química* (Primera ed.). Barcelona, España: Reverté.
- González , L., & Puerto, G. (23 de Noviembre de 2013). Estimación de la cantidad de potencia suministrada por las celdas fotovoltaicas. *Tecnura*, 15-16.

- Halliday, D., & Resnick, R. (2001). *Fundamentos de Física* (Tercera ed.). Chile: Continental.
- Keithley Tektronix Company. (12 de Septiembre de 2014). *SourceMeter Line Series 2400*. Obtenido de Web site:  
<http://www.keithley.com/products/dcac/voltagesource/broadpurpose/?mn=2400>
- Kosyachenko, L. A. (2011). *Solar Cells* (Primera ed.). Rijeka, Croacia: InTech.
- Llinares, J., & Page, A. (1997). *Electromagnetismo y Semiconductores* (Primera ed.). España: Reproval S.L.
- López Cárdenas, J. P., & Dávila Marín, P. F. (2011). “*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TABLERO DIDÁCTICO DE UN SISTEMA DE LUMINARIAS INTELIGENTES PARA DIRECCIONAR DE ACUERDO A LA TRAYECTORIA Y VELOCIDAD DEL VEHÍCULO*”. Riobamba, Ecuador.
- Méndez Muñiz, J. M., & Cuervo García, R. (2007). *Energía Solar Fotovoltaica* (Segunda ed.). Madrid, España: Fundación Confemetal.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (7 de Marzo de 2013). *Noticias: MEER*. Obtenido de web site: <http://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (23 de Octubre de 2014). *Dirección de Biomasa y Coogeneración*. Obtenido de MEER:  
<http://www.energia.gob.ec/direccion-de-biomasa-y-coogeneracion/>
- Moller, R. (2006). *Transporte Urbano y Desarrollo Sostenible en América Latina* (Primera ed.). Colombia: Universidad del Valle.
- Moro, M. (2010). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas* (Primera ed.). Madrid, España: Ediciones Paraninfo S.A.
- Mosca, T. (2007). *FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGIA* (Quinta ed.). Barcelona, España: Reverté S.A.
- Pérez Moret, Y. (2012). *Diseño y construcción de un espectrómetro óptico por USB* (Primera ed.). Altamira, México: LULU.
- Puig, J., & Corominas, J. (1990). *La Ruta de la Energía* (Primera ed.). Barcelona, España: Anthropos. Promat, S. Coop. Ltda.
- Romero Tous, M. (2009). *Energía solar térmica de baja temperatura* (Primera ed.). Barcelona, España: Ceac.
- Schneider, E. (2004). *Salud por la Naturaleza* (Segunda ed.). España: Safeliz.

Timofeyev, Y. M., & Vasil'ev, A. V. (2008). *Theoretical Fundamentals of Atmospheric Optics*. UK: Cambridge International Science Publishing Ltd.

## ANEXOS

### Anexo 1. Inventario de materiales y herramientas del laboratorio de películas delgadas.

Inventario de materiales y herramientas del laboratorio de películas delgadas	
Cajas vacías y Manuales de los equipos	Equipos de medición y materiales
Keithley	Osciloscopio y accesorios
Centrifuga	524010 Sensor-Cass y accesorios
Balanza	Caja de transformador
Hotplate	2 Bases de metal
Cocina eléctrica	5 Barillas
<b>Materiales de óptica</b>	Una nuez de laboratorio
3 cajas de vidrio (grande, mediano y pequeño)	1 Sujetador
2 Cilindros de metal	1 Riel grande y 2 pequeñas
Varias piezas de espejos	Un tablero de madera A3
Lente de fresnel	1 tornillo micrométrico
Accesorios microscopio de fluorescencia	<b>Materiales de celdas solares</b>
Espejo semiplatedado	5 Mallas para deposición de TiO <sub>2</sub>
Espejo de cara frontal	2 Láminas de acetato para las mallas
Espectrometro visible infrarrojo	Papeles, cartulina y acetato
Fuente de luz halógena	Un taípe
Cargador de la laptop y del espectrometro	2 cintas masking (ancha, delgada)
2 cables de fibra optica (UV/VIS y SR)	1 cinta scotch grande
Fotoelemento de silicio	2 Rieles
Un adaptador	2 Cajas de plástico
Varias piezas de madera	Pedazo vidrio
3 lentes de +16,+10 y + 5	1 Toalla
Luces de xenón	<b>Cristalería</b>
Interferómetro de Michelson y Morley	4 Vasos precipitación 10ml
Laser de HeNe de 632.8 nm	3 Vasos precipitación 20ml
<b>Soluciones</b>	Vaso precipitación 200ml
<b>Serigrafía</b>	Vaso precipitación 100ml
1 frasco de desengrasante liquido	Vaso precipitación 250ml
1 frasco Retardante PVC	Vaso precipitación 400ml
1 frasco recuperador conc	2 Vaso precipitación 1000ml
2 frascos Sera- gel	Vaso precipitación 600ml
1 frasco antivelo	2 Frasco de cristal 25x40 mm
1 frasco endurecedor	Matraz 250ml
1 frasco Screen line	Matraz 500ml
1 frasco autotype	Probeta 1000ml
1 frasco solvente butil	Probeta 500ml

2 botellas metanol 3 kilos.	Probeta 250ml
1 frasco concen	Probeta 100ml
1 frasco Hydrogen peroxide	Probeta 50ml
1 botella Ethylene glycol 99%	Probeta 25ml
1 botella agua destilada	Probeta 10ml
1 botella metanol 35%	2 mecheros Bunsen
1 botella acetone	1 Mortero
1 botella Hydrochloric acid fuming 37%	2 Cajas de cubreobjetos (24x40mm y 22x22mm)
1 botella ammonia 25%	Vidrio de reloj
1 botella 2- propanol	12 Tubos de ensayo
2 botellas metanol 3 kilos.	2 Jeringuillas
<b>Equipos y materiales sobre la mesa</b>	2 Varillas de vidrio
1 Fuente de voltaje AC/DC	1 Termómetro de Hg
Fuente y medidor de V, I, R (Keithley)	5 Pipetas de 25ml
1 Bomba de vacío	5 Pipetas de 5ml
Máquina de deposición	5 Pipetas de 10ml
3 Centrifugadora (pequeña, mediana, grande)	3 Pinzas para crisol
1 Microscopio	1 Varilla de metal
1 Cautín	12 Pinzas de madera para tubo de ensayo
1 Cocineta de 2 quemadores	1 Esponja
1 Sistema de purificación del Agua	1Frasquito de paper points #15
1 Hotplate	1 Frasco de paper points #20
1 Ultrasonic cleaner	1 Frasco de paper points #25
1 Balanza	1 Frasco de paper points #40
1 Juego de pipetas Biopette	1 Embudo de decantación de 100ml
1 Computadora	1 Embudo de decantación de 250ml
1 caja de guantes de latex	1 Embudo de decantación de 500ml
1 caja de guantes de nitrilo	1 Embudo de decantación de 1000ml
4 Paños de limpieza	1 Espatula
1 tubo de plástico	1 Cuchara espátula de metal
Toallas absorbentes	2 Pinza de metal para tubo de ensayo
1 botellón de agua destilada	1 Cuchara de miro y espátula de metal
1 funda de servilletas	1 pinza metálica para tubo de ensayo
Gafas protectoras	
<b>Otros</b>	
1kg de Citic acid monohydrate	Guantes hule
2 frascos 1kg de Potassium chloride	Guantes tela
1 frasco 250g Ammonium fluoride	Guantes de protección térmica
1 frasco Aluminum nitrate nonahydrate	Pistola de calor
1 frasco Zinc nitrate hexahydrate	1 Brocha

1 frasco Potassium nitrate	1 Hotplate
1 frasco Titanium (IV) oxysulfate	1 Contenedor muestras
	1 waterproof phtestr ( medidor de ph)
2 Multímetros	1 Tubo (mangera) de plastico
1 Taladro	2 cajas purificadores centrífuga de alta velocidad
1 Taladro pequeño	2 filtro purificador de agua
2 Calibradores	
Juego de brocas	Cargador de batería 6-12V
1 Maletín de herramientas	Fuente de voltaje 20V DC
1 Sierra	Fuente de voltaje DC
Macilla	Lámpara holágena
	Aquarium air pump
2 cautín	Pro-peak prodigy
Paquete de tornillos	Ácido para quemar baterías
Varios dispositivos electrónicos	2 placas de cobre